

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

DOTTORATO DI RICERCA IN

Colture Erbacee, Genetica Agraria, Sistemi Agroterritoriali

Ciclo XXI

Settore scientifico-disciplinare di afferenza: AGR/02

TITOLO TESI

Analisi ambientale della coltivazione di biomasse a scopo energetico con metodologia Life Cycle Assessment (LCA)

Presentata da: SIMONE FAZIO

Coordinatore Dottorato

**Chiar.mo prof.
Giovanni Dinelli**

Relatore

**Chiar.mo prof.
Gianpietro Venturi**

**Correlatore
Dott. Andrea Monti**

Esame finale anno 2010

FRONTESPIZIO	1
INTRODUZIONE	6
SITUAZIONE ENERGETICA E POLITICHE DI RIFERIMENTO	8
BIOMASSE	15
TECNOLOGIE D'IMPIEGO	17
COLTURE DEDICATE	20
CARATTERISTICHE QUALITATIVE DELLA BIOMASSA	22
COLTURE IN ESAME	25
CANNA COMUNE	25
SWITCHGRASS	31
MISCANTO	37
CARDO	41
SORGO DA FIBRA	45
MAIS	49
FRUMENTO	55
GIRASOLE	58
COLZA	62
LCA IN AGRICOLTURA, STATO DELL'ARTE	65
MATERIALI E METODI	68
FASI DI UNA LCA	68
SCENARI	83
ANALISI DELL'INTERA FILIERA	86
RISULTATI E DISCUSSIONI	89
ANALISI SU BASE AREAICA (HA)	89
STANDARDIZZAZIONE	89
CARATTERIZZAZIONE	90
NORMALIZZAZIONE	92
SINGLE SCORE	93
ANALISI SU BASE ENERGIA	96
STANDARDIZZAZIONE	96
CARATTERIZZAZIONE	98
NORMALIZZAZIONE	100
SINGLE SCORE	101
ANALISI DI FILIERA	102
DISCUSSIONI	105
CONCLUSIONI	112
BIBLIOGRAFIA	114
BIBLIOGRAFIA ON-LINE	125
SITI WEB CONSULTATI	129

Introduzione

I segnali di cambiamento climatico ingenerano diverse preoccupazioni per il futuro del pianeta (Ragauskas et al., 2006), le emissioni di anidride carbonica sono aumentate di oltre l'80% dai primi anni 70 al 2004, principalmente a causa dell'utilizzo di combustibili fossili (IPCC, 2007), e in misura minore, dai cambiamenti nell'utilizzo del suolo (Kucharik et al., 2001).

L'innalzamento della temperature globale è ancor più preoccupante in visione dell'incremento notevole di emissioni che è previsto per i prossimi decenni (IPCC, 2007), soprattutto dovuto all'avanzamento economico dei paesi in via di sviluppo che non può prescindere da un aumento dei consumi energetici e, conseguentemente, delle emissioni di gas climalteranti.

Come noto infatti, il settore dell'energia è il maggior responsabile delle emissioni di gas-serra (Oliver et al., 1999), e il consumo di energia primaria è previsto aumentare dell'1,8% l'anno da oggi al 2030 (IEA, 2007), con questi presupposti è ovvio che tentare di mitigare l'alterazione del clima passa inevitabilmente attraverso un'azione coordinata di cambiamento del sistema di approvvigionamento energetico, che dovrà dipendere sempre meno da combustibili di origine fossile in favore delle fonti energetiche rinnovabili.

Oltre agli accordi internazionali che tracciano le linee-guida per il perseguimento di tale obiettivo. L'UE attraverso la direttiva chiamata "20-20 by 2020" (Commissione Europea, 2008), che prevede una riduzione del 20% delle emissioni (base 1990) e un utilizzo di fonti energetiche primarie rinnovabili per almeno il 20% dell'approvvigionamento. La tendenza di lungo termine è ancora più ambiziosa, nel vertice del G8 che ha avuto luogo in Giappone nel luglio 2008, è stato sottoscritto da parte di tutti i paesi partecipanti un impegno a ridurre le emissioni di gas serra del 50% entro il 2050.

In questo contesto le colture energetiche dovrebbero assumere un importante ruolo, già nel breve-medio periodo, nella sostituzione dei combustibili fossili, con investimenti sempre crescenti di superficie coltivata, fino a coprire diversi milioni di ettari in Europa verso il 2020 (Commissione Europea, 2005).

Tuttavia, il passaggio dei terreni agricoli a sistemi non-food è oggetto di dibattito nella politica mondiale, in primis per i dubbi ingenerati sulla sicurezza dell'approvvigionamento di cibo e il possibile ruolo che le colture agro-energetiche possono giocare sull'andamento dei prezzi, nonostante diversi studi abbiano mostrato che una larga quota di terreni oggi utilizzati per colture tradizionali, potranno essere destinati a colture non-food senza conseguenze significative sull'andamento dei prezzi alimentari (Smeets et al 2007). In secondo luogo, sebbene le conoscenze sulle colture da biomassa siano in continuo avanzamento, l'impatto ambientale di queste colture è ancora da chiarire, la riduzione delle emissioni di CO₂ in fase di combustione infatti potrebbe in alcuni casi non compensare le emissioni di gas serra dal terreno, inoltre occorre tener conto anche delle altre esternalità prodotte nelle diverse fasi delle filiere agroenergetiche.

In quest'ottica la metodologia LCA, che permette analisi multicriteriali su diversi step delle filiere produttive, può rappresentare uno strumento molto utile per fornire indicazioni e permettere comparazioni sulla base delle diverse esternalità derivanti da diversi scenari.

Lo scopo dello studio è stato quello di confrontare diverse filiere agroenergetiche (biodiesel, bioetanolo e generazione elettrica), basate su materie prime provenienti da colture dedicate di diversa matrice (oleaginose, cereali e lignocellulosiche), valutate positivamente a tale scopo negli ultimi anni da diversi studi (Berndes et al. 2003; Hallam et al., 2001; Lewandowski et al., 2003). Lo studio LCA è stato approfondito in maniera particolare sulla fase agricola (Basset-Mens, 2005; Brentrup et al., 2004), anche se per alcuni indicatori è stato calcolato il potenziale impatto di tutta la filiera. La fase di coltivazione, che risulta ancora scarsamente investigata in maniera analitica, e viene considerata solo in maniera secondaria in

studi LCA di intere filiere agroenergetiche, risulta però avere una significativa incidenza sull'intera catena produttiva (Kaltschmitt et al., 1997; Hartmann and Kaltschmitt, 1999; Heller et al., 2003, Gasol et al., 2007, 2008) ed è responsabile di almeno il 10% del totale consumo energetico e di circa il 25% delle totali emissioni di CO₂ (Eucar-JRC-Concawe, 2007).

Situazione energetica e politiche di riferimento

La domanda di energia cresce nel mondo ad un ritmo elevato, soprattutto in virtù del forte sviluppo dei paesi emergenti asiatici, di pari passo aumenta anche il consumo di fonti energetiche primarie, i trend di sfruttamento delle risorse energetiche infatti mostrano per l'anno in corso andamenti crescenti, per quasi tutte le fonti ad eccezione del nucleare; particolare preoccupazione suscita il forte aumento del consumo di carbone (+4,5%) e di gas naturale (+3,1%). Il consumo di fonti rinnovabili ed in particolare di energia proveniente dalle biomasse è anch'esso in crescita in termini relativi (+4,7%) tuttavia il totale consumo di bioenergia, se si eccettua il consumo di legna da ardere nei paesi in via di sviluppo, risulta essere inferiore all'incremento del consumo di carbone nell'ultimo anno (IEA-WEO). Durante il vertice del G8 di Toyako (2008), i paesi industrializzate hanno raggiunto un accordo di massima per un dimezzamento delle emissioni di gas entro il 2050, l'accordo è stato sottoscritto anche dai principali paesi in via di sviluppo. Questi Paesi che non fanno parte del G8, hanno quindi accettato la scadenza del 2050 ma sono restii ad accettare il termine impegnativo del 2020.

A livello europeo, il 50% del fabbisogno energetico è soddisfatto dall'importazione di petrolio e gas da paesi extracomunitari. L'UE ha incrementato fortemente le importazioni di petrolio (+10% dal 1995 al 2005), e di gas naturale (+58% nello stesso periodo).

Nella decade il tasso totale di dipendenza energetica dei 27 Stati membri dell'UE è aumentato di 9 punti percentuali; undici Paesi hanno ridotto, nel 2005, la loro dipendenza energetica rispetto al 1995, ma altri undici hanno aumentato la loro

dipendenza dallo 0,4% al 9,6%; altri Stati, come Ungheria, Polonia, Paesi Bassi e Irlanda hanno registrato un aumento della dipendenza energetica superiore al 15%. Il contributo delle energie rinnovabili sul totale del consumo interno lordo è passato dal 5,1% nel 1995 al 6,7% nel 2005 con una crescita relativa del 31%. Nel 2006 la biomassa ha rappresentato una quota predominante (68%) sul totale dell'energia da fonti rinnovabili.

L'Unione Europea ha sottoscritto diversi accordi internazionali per la riduzione delle emissioni di anidride carbonica in atmosfera, e recentemente anche altri paesi che non avevano aderito in passato a tali accordi stanno riconsiderando le proprie posizioni.

La situazione energetica e i vincoli ambientali hanno delineato delle precise scelte politiche all'interno dell'UE, ponendo vincoli ai paesi membri per il raggiungimento di determinati obiettivi in tempi prestabiliti (figura 1).

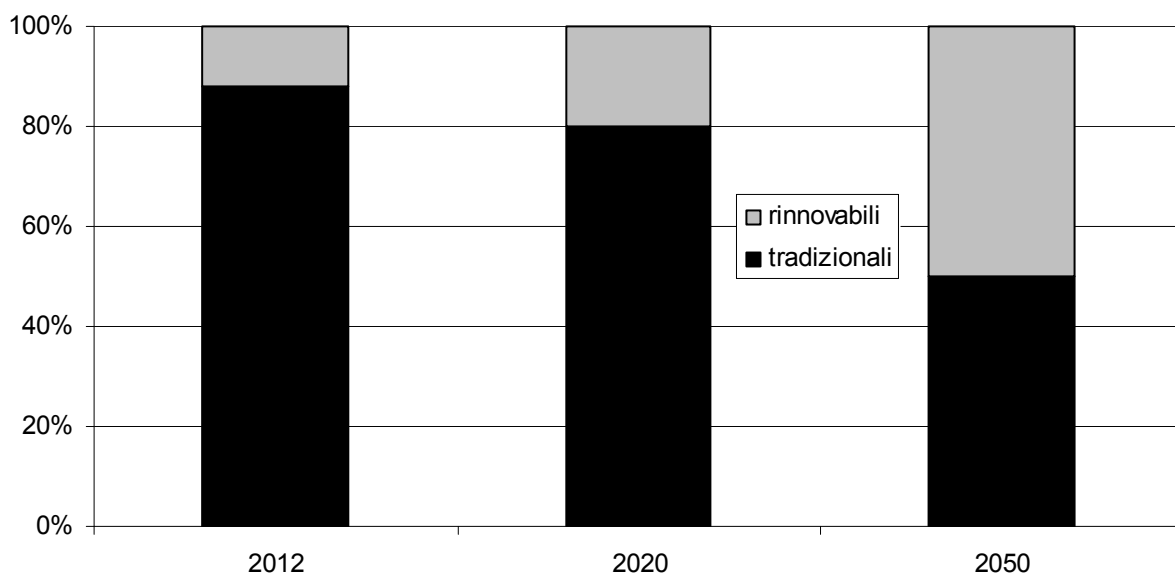


Figura 1. share di approvvigionamento energetico da fonti rinnovabili previsto dagli accordi internazionali nei prossimi decenni.

L'Unione Europea deve affrontare delle problematiche energetiche reali sia sotto il profilo della sostenibilità e delle emissioni dei gas serra che dal punto di vista della sicurezza dell'approvvigionamento e della dipendenza dalle importazioni, senza

dimenticare la competitività e la realizzazione effettiva del mercato interno dell'energia.

Il Libro verde sull'energia (1996 e revisione 2006) costituisce una tappa importante nello sviluppo di una politica energetica dell'Unione europea (UE). In quanto secondo mercato energetico del mondo, l'UE può far valere il suo primo posto a livello mondiale nel settore della gestione della domanda e della promozione delle fonti di energia rinnovabili.

La politica energetica europea si articola su tre obiettivi principali:

- la sostenibilità, per lottare attivamente contro il cambiamento climatico, promuovendo le fonti di energia rinnovabili e l'efficienza energetica;
- la competitività, per migliorare l'efficacia della rete europea tramite la realizzazione del mercato interno dell'energia;
- la sicurezza dell'approvvigionamento, per coordinare meglio l'offerta e la domanda interne di energia dell'UE nel contesto internazionale.

Il Libro verde individua i settori di azione prioritari, per i quali la Commissione propone misure concrete al fine di attuare una politica energetica europea che fornisca un'energia sostenibile, competitiva e sicura per i decenni futuri.

Determinata a combattere i cambiamenti climatici, l'UE s'impegna a ridurre di almeno il 20% le proprie emissioni interne entro il 2020, portando anche le rinnovabili a raggiungere la quota del 20% sulle fonti primarie utilizzate a scopo energetico, inoltre s'impegna ad incrementare del 20% l'efficienza energetica dei sistemi produttivi.

La riduzione delle emissioni di gas serra quindi, passa attraverso un minor consumo di energia e un maggiore ricorso a fonti di energia rinnovabili. Per raggiungere questo obiettivo è necessario fare passi avanti nei tre settori che più di altri utilizzano queste fonti:

- la produzione di energia elettrica: aumentando la produzione di elettricità da fonti rinnovabili e producendo elettricità in maniera sostenibile a partire dai

- il consumo di combustibili per autotrazione: aumentando l'uso di biocarburanti, che nel 2020 dovranno rappresentare il 10% dei combustibili;
- impianti di riscaldamento e condizionamento: incrementandone l'efficienza e riducendone i consumi.

Rispetto alla media dei 27 Paesi dell'Unione Europea, i consumi di energia primaria in Italia si caratterizzano per un maggiore ricorso a petrolio e gas, per una componente strutturale di importazioni di elettricità (circa il 5% dei consumi primari), si registra al contrario un ridotto contributo del carbone (solo il 9% dei consumi primari di energia) e l'assenza di generazione elettronucleare; la quota di fonti energetiche rinnovabili sul totale dei consumi primari di energia è leggermente più elevata rispetto alla media dei Paesi OCSE soprattutto grazie al notevole apporto della fonte idroelettrica. Il trend 2000-2007 mostra come vada crescendo la dipendenza dalle importazioni di gas naturale rispetto a quelle di petrolio, sintomo sia di un maggiore ricorso alle importazioni che del rapido declino della produzione nazionale di idrocarburi.

La posizione attuale dell'Italia, rispetto al protocollo di Kyoto e successivi provvedimenti europei è definita nella "Quarta Comunicazione nazionale dell'Italia alla Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sul Cambiamento Climatico".

Nella valutazione si è tenuto conto dei dati a consuntivo del 2005, di uno scenario di riferimento al 2010 che contiene i dispositivi legislativi e normativi decisi e operativi fino a quella data, e dell'analisi del quadro delle politiche e misure messe in atto a livello nazionale. Considerando le emissioni all'anno di riferimento, 1990, pari a 517 Mt CO₂ eq l'obiettivo individuato per l'Italia dal Protocollo risulta pari a 483 Mt CO₂ eq. tenendo conto dello scenario tendenziale al 2010 pari a 587 Mt CO₂ eq la distanza da colmare per raggiungere l'obiettivo risulta 104 Mt CO₂ eq.

Le misure decise e operative individuate per colmare la distanza dall'obiettivo contribuiscono alla riduzione di gas serra per 7,4 Mt CO₂ eq. e l'insieme delle misure decise ma non ancora operative e allo studio risultano pari a 16,5 Mt CO₂ eq. A queste bisogna aggiungere il contributo dell'assorbimento di carbonio (sinks) pari a 25,3 Mt CO₂ eq. Inoltre, con riferimento alla direttiva ETS (Direttiva 2003/87/CE Emission Trading System), il contributo dei settori ad essa soggetti è stato stimato pari a 13,2 Mt CO₂ eq per anno; anche ipotizzando che i fattori appena elencati producano nel 2010 il 100% dei risultati attesi, l'obiettivo resta ancora distante, e pone il nostro paese in una situazione di "debito" pari a 41 Mt CO₂ eq.

Per contribuire a ridurre questa ulteriore distanza si è ipotizzato un ricorso all'uso di meccanismi flessibili pari a 20,8 Mt CO₂ eq (di cui 3,4 già decisi e operativi), pari al 20% della distanza complessiva come da indicazioni governative. Considerando tutte quelle misure che si possono ritenere acquisibili entro il periodo di riferimento 2008-2012, si arriva a un valore di emissione superiore del 4% al valore del 1990. Difficilmente, quindi, l'obiettivo di Kyoto potrà essere raggiunto e, in vista del secondo periodo di impegno, sarà necessario mettere in campo ulteriori politiche e misure che consentano di conseguire riduzioni importanti.

Per quanto riguarda l'impegno relativo al primo periodo, va sottolineato che l'Italia, dal 1° gennaio 2008, sta accumulando giornalmente un debito di oltre 4 milioni di euro che arriverà dunque entro la fine del 2009 a quasi 3 miliardi di euro.

Il principale documento di politica energetica nazionale, cui fare riferimento, in cui si definiscono obiettivi e priorità della politica energetica in Italia, è il Piano Energetico Nazionale. L'ultimo aggiornamento, approvato dal Consiglio dei Ministri nell'agosto del 1988, pur rimanendo valido nell'individuazione di obiettivi prioritari (competitività del sistema produttivo, diversificazione delle fonti e delle provenienze geopolitiche, sviluppo delle risorse nazionali, protezione

dell'ambiente e della salute dell'uomo e risparmio energetico) è un documento ormai datato, anche perché si riferisce ad un quadro istituzionale e di mercato che nel frattempo ha subito notevoli mutamenti, anche per effetto della crescente importanza e influenza di una comune politica energetica a livello europeo.

Ultimamente il governo ha annunciato che entro il 2009 sarà presentato un nuovo piano energetico nazionale ("Il sole 24 ore" del 20 settembre 2008).

Le principali norme sulle fonti energetiche rinnovabili e sul risparmio energetico, quindi la politica energetica italiana, derivano da:

- applicazione del Piano Energetico Nazionale, in cui si era fissato l'obiettivo al 2000 di aumentare la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili del 44%, con una ripartizione interna di questo mercato suddiviso in 300 MW di energia eolica, 75 MW di energia solare fotovoltaica e l'adozione da parte di tutte le Regioni di Piani d'Azione per l'utilizzo e la promozione di energie rinnovabili sul proprio territorio.
- Leggi 9/91 e 10/91, che hanno introdotto l'aspetto significativo della parziale liberalizzazione della produzione dell'energia elettrica da fonti rinnovabili e assimilate e reca norme in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti di energia.
- aggiornamento del D.P.R. 412/93 con il D.P.R. 551/99, in materia di progettazione, installazione, esercizio e manutenzione degli impianti termici degli edifici, ai fini del contenimento dei consumi di energia. L'aggiornamento ha introdotto norme precise sui rendimenti degli impianti termici nonché sulle modalità di controllo e verifica da parte delle Province e dei Comuni.
- "Libri Bianchi" sullo sviluppo delle fonti energetiche rinnovabili nell'Unione europea e in Italia. Decreti Legislativi 79/99 e 164/2000.

Il governo italiano, seguendo l'esempio dei paesi scandinavi e dell'Olanda, aveva deciso di adottare, con la Legge Finanziaria n. 488 del 1999, la Carbon Tax, uno strumento fiscale che gravava sui combustibili fossili in relazione al quantitativo di

carbonio emesso durante il processo di combustione. La logica del tributo era quella di incentivare l'uso di prodotti energetici a basso contenuto di carbonio a sfavore di quelli ad alto contenuto. La Carbon Tax trovava la sua legittimazione nell'impegno sulla riduzione del gas serra sottoscritto dal nostro governo a Kyoto. Tale tributo presentava positive ricadute sulla qualità ambientale e sull'occupazione; il Ministero aveva stimato una riduzione dovuta all'applicazione della tassa pari a 12 milioni di tonnellate di anidride carbonica in meno emesse in atmosfera, mentre lo sgravio del costo del lavoro ed i nuovi investimenti, sollecitati dalla necessità di maggiore efficienza energetica, avrebbero favorito la creazione di nuovi posti di lavoro.

La Carbon Tax è stata applicata solamente per il 1999 in quanto dal 2000 la tassa è stata sospesa per ridurre il prezzo dei carburanti a causa di un forte aumento del costo del petrolio.

Altro importante obiettivo della Politica Energetica Nazionale è il raggiungimento di uno sviluppo sostenibile, e quindi di un consumo energetico compatibile con il mantenimento di un adeguato standard di qualità ambientale e di utilizzo delle risorse naturali. Argomento principale è la riduzione delle emissioni di gas serra e il relativo Protocollo di Kyoto del dicembre 1997.

In Italia, con il Provvedimento CIPE del 28 dicembre 1993 è stato presentato il "Piano Nazionale per lo Sviluppo Sostenibile".

Con la successiva Delibera CIPE del 19 novembre 1998, n. 137, l'Italia ha recepito il Protocollo di Kyoto impegnandosi a ridurre del 6,5% le emissioni rispetto ai valori del 1990, tra il 2008 e il 2012.

Il Governo Italiano ha predisposto una bozza di Decreto Legislativo del 25 luglio 2003 per recepire la direttiva 2001/77/CE sulla promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili, appunto per ridurre l'emissione di CO₂.

Il nuovo piano energetico approvato nel gennaio 2007 è focalizzato principalmente sul risparmio energetico e sulle fonti rinnovabili, due obiettivi che possono

rappresentare un'occasione di sviluppo industriale, economico e sociale per l'Italia. Fra le azioni previste vi sono:

- Fondo Kyoto: 600 milioni di euro per il triennio 2007-2009 sono stati assegnati dalla finanziaria 2007 in favore di misure per la riduzione delle emissioni di gas serra;
- incentivazione del settore agro-energetico attraverso la riduzione della tassazione del biodiesel per 250 mila tonnellate anno e del bioetanolo per 100 mila tonnellate anno;
- individuazione di strumenti di sviluppo di filiere produttive, dall'agricoltura all'industria di trasformazione;
- incentivazione del fotovoltaico attraverso la concessione di un incentivo che va da 0,36 €/kWh a 0,49 €/kWh;
- potenziamento dei certificati bianchi;
- potenziamento dei certificati verdi;
- incentivazione della cogenerazione ad alto rendimento.

Biomasse

Le fonti rinnovabili sono risorse energetiche che hanno la capacità di rinnovarsi in un tempo minore o uguale a quello in cui vengono consumate; al contrario le fonti non rinnovabili, dette anche esauribili, sono quelle il cui utilizzo ed impiego è limitato nel tempo a causa della loro irriproducibilità, o comunque al loro lentissimo rinnovamento; sono un esempio il petrolio, il gas naturale, il carbone, etc.

Esistono diversi tipi di fonti energetiche rinnovabili:

- *Idroelettrica*: sfrutta l'energia cinetica prodotta dall'acqua che cade da bacini artificiali posti a monte, entro condotte chiuse, e mediante apposite turbine, viene trasformata in energia elettrica;
- *Geotermica*: sfrutta l'energia termica (dove possibile) direttamente dal sottosuolo;

- Fotovoltaica*: l'energia contenuta nella radiazione solare viene convertita in elettricità in apposite celle al silicio;
- Eolica*: sfrutta l'energia cinetica del vento per azionare turbine (munite di pale) che producono energia elettrica;
- Biomassa*: utilizza materiale organico per ricavare combustibile; il calore generato dalla trasformazione, viene poi usato per generare elettricità, in alternativa, mediante trasformazioni chimiche, fisiche o biologiche del materiale organico di partenza si possono ricavare carburanti utilizzabili per autotrazione.

Tra le fonti rinnovabili, le biomasse suscitano un notevole interesse e le Istituzioni hanno attribuito ad esse prospettive di sviluppo a breve termine superiori a tutte le altre fonti rinnovabili (in UE, entro il 2010 è previsto un contributo pari al 8% delle biomasse sulla produzione di energia elettrica (COM UE 2007), e in Italia di almeno 3 Gtep con un risparmio di emissioni di CO₂ di oltre 9 Mt (CIPE 2007).

Con il termine biomassa si intendono tutte le sostanze di matrice organica non fossile (APEAC 2007). La relativa brevità del periodo di rigenerazione fa sì che le biomasse rientrino tra le fonti energetiche rinnovabili, in quanto il tempo di sfruttamento della sostanza organica è paragonabile a quello di formazione.

La biomassa utilizzabile ai fini energetici consiste in tutti quei materiali organici che possono essere utilizzati direttamente come combustibili oppure trasformati in combustibili solidi, liquidi o gassosi.

Sono quindi biomasse, oltre alle colture coltivate espressamente per scopi energetici, tutti i prodotti delle coltivazioni agricole e della forestazione, compresi i residui delle lavorazioni agricole e della silvicoltura, gli scarti dei prodotti agro-alimentari destinati all'alimentazione umana o alla zootecnia, i residui, non trattati chimicamente, dell'industria della lavorazione del legno e della carta, tutti i prodotti organici derivanti dall'attività biologica degli animali e dell'uomo, come quelli contenuti nei rifiuti urbani (la cosiddetta FORSU, frazione organica dei

rifiuti solidi urbani).

Nell'accezione più generale si può quindi considerare "biomassa" tutto il materiale di origine organica sia vegetale, sia animale.

I combustibili solidi, liquidi o gassosi derivati da questi materiali (direttamente o in seguito a processi di trasformazione) sono definiti biocombustibili, mentre qualsiasi forma di energia ottenuta con processi di conversione della biomassa è definita bioenergia.

Tecnologie d'impiego

L'utilizzo delle biomasse presenta una grande variabilità in funzione della tipologia dei materiali disponibili. Nel tempo, sono state sviluppate molte tecnologie di conversione energetica, delle quali alcune possono considerarsi giunte ad un livello di sviluppo tale da consentirne l'utilizzazione su scala industriale; altre, invece, più recenti e molto complesse, necessitano di ulteriore sperimentazione al fine di aumentare i rendimenti e ridurre i costi di conversione energetica.

I processi utilizzati attualmente sono riconducibili a due grandi categorie:

- processi termochimici
- processi biochimici

all'interno dei quali si suddividono le tecnologie attualmente disponibili; ad eccezione della combustione diretta, tutte le altre rappresentano pretrattamenti mirati ad aumentare la resa termica, a sfruttare completamente il materiale disponibile, a migliorarne le caratteristiche di stoccaggio o di trasporto, oppure a ridurre i residui dopo l'utilizzazione.

Processi termochimici

I processi di conversione termochimica sono basati sull'azione del calore che permette le reazioni chimiche necessarie a trasformare la materia in energia e sono utilizzabili per i prodotti ed i residui cellulosici e legnosi in cui il rapporto C/N

abbia valori superiori a 30 ed un contenuto di umidità che non superi il 30% (tali valori sono indicativi di riferimento). Ad esempio, 1 kg di legna secca (15% umidità residua) fornisce 4,3 kWh di energia e, quindi, 3 kg di legno equivalgono ad 1 kg di gasolio mentre 2,3 kg di legno corrispondono a 1 m³ di metano.

Il più semplice dei processi termochimici consiste nell'ossidazione completa del combustibile a H₂O e CO₂ ed è la combustione diretta attuata in caldaie in cui avviene anche lo scambio di calore tra i gas di combustione ed i fluidi di processo.

La Carbonizzazione è un processo di pretrattamento del materiale vegetale che consiste nell'alterazione termochimica della biomassa mirato a conferirle migliori caratteristiche mediante somministrazione di calore in presenza di poco ossigeno e la conseguente eliminazione dell'acqua e delle sostanze volatili non combustibili dalla materia vegetale.

Un ulteriore processo di degradazione termochimica di materiali organici è la pirolisi: attraverso l'azione del calore, a temperature elevate (tra 400 e 800°C) e in completa assenza degli agenti ossidanti (aria o ossigeno) o con una ridottissima quantità di ossigeno (in questo caso il processo può essere descritto come una parziale gassificazione) si ottengono prodotti gassosi, liquidi e solidi che successivamente vengono utilizzati come combustibili.

La gassificazione consiste nella trasformazione in combustibile gassoso di un combustibile solido o liquido, nel caso specifico della biomassa, attraverso una decomposizione termica (ossidazione parziale) ad alta temperatura (900÷1.000°C). Il gas prodotto è una miscela di H₂, CO, CH₄, CO₂, H₂O (vapore acqueo) e N₂, accompagnati da ceneri in sospensione e tracce di idrocarburi (C₂H₆). Per rendere economicamente più valido questo processo si può trasformare il gas in alcool metilico (CH₃OH), che può essere impiegato per l'azionamento di motori. Il metanolo, caratterizzato da un potere calorifico inferiore dell'ordine di 21.000 kJ/kg, può essere successivamente raffinato per ottenere benzina sintetica, con potere calorifico analogo a quello delle benzine tradizionali.

La steam explosion (SE) è un trattamento innovativo, a basso impatto ambientale,

mediante il quale si può ottenere una vasta gamma di prodotti, utilizzando come materia prima le biomasse vegetali. Rispetto agli altri processi di pretrattamento, la SE presenta il vantaggio fondamentale di separare in tre differenti correnti le frazioni costituenti i comuni substrati vegetali (emicellulosa, cellulosa, lignina) rendendo possibile l'utilizzazione totale delle biomasse, attraverso l'uso di vapore saturo ad alta pressione per riscaldare rapidamente legno, o qualsiasi altro materiale lignocellulosico, all'interno di un reattore.

Si citano anche la Co-Combustione e la Co-Gassificazione volti a utilizzare nello stesso impianto le biomasse insieme a combustibili tradizionali come il carbone o i derivati dal petrolio.

Processi biochimici

I processi di conversione biochimica sono dovuti al contributo di enzimi, funghi e microrganismi, che si formano nella biomassa in particolari condizioni e vengono preferenzialmente impiegati per quei substrati in cui il rapporto C/N sia inferiore a 30 e l'umidità alla raccolta superiore al 30%.

La digestione anaerobica è un processo di fermentazione della materia organica ad opera di microrganismi in assenza di ossigeno; consiste nella demolizione delle sostanze organiche complesse contenute nei vegetali e nei sottoprodotti di origine animale (lipidi, protidi, glucidi), che dà origine ad un gas (biogas) costituito per il 50-70% da metano e per la restante parte soprattutto da CO₂, con un potere calorifico medio dell'ordine di 23.000 kJ/Nm³.

Un ulteriore processo biochimico è la fermentazione aerobica che consiste nella metabolizzazione ad opera di batteri delle sostanze organiche, in ambiente condizionato dalla presenza di ossigeno. Questi microrganismi convertono sostanze complesse in altre più semplici, liberando CO₂ e H₂O e producendo un elevato riscaldamento del substrato, proporzionale alla loro attività metabolica. Il calore prodotto può essere così trasferito all'esterno, mediante scambiatori a fluido. La fermentazione alcolica è un processo di tipo microaerofilo che opera la trasformazione dei glucidi contenuti nelle produzioni vegetali in etanolo. L'etanolo

risulta un prodotto utilizzabile anche nei motori a combustione interna di tipo “dual fuel”.

Alcune specie vegetali presentano la caratteristica di avere semi ricchi di oli che possono essere estratti ed utilizzati come combustibili per alimentare gruppi elettrogeni attraverso la combustione diretta. Queste piante, dette oleaginose (soia, colza, girasole, mais, ecc.), producono quantità di olio in misura del 20-50% del peso con un notevole potere calorico (fino a 10.000 kcal/kg). Gli oli ottenibili sono adatti, per semplicità di trasformazione ed utilizzazione, alla produzione di energia elettrica ed energia termica con impianti di combustione a tecnologia molto semplice. Gli oli vegetali combustibili sono utilizzati nello stato in cui vengono estratti, a condizione che presentino le caratteristiche idonee in termini di ridotti contenuti di acqua ed impurità, o meglio dopo esterificazione (processo che avviene tramite aggiunta di metanolo per l'eliminazione della glicerina), in modo da assicurare la compatibilità con i motori endotermici. (Rinnovabili 2007).

Colture Dedicate

Le colture energetiche dedicate sono spesso rappresentate da specie finora considerate spontanee o già coltivate per altri scopi (fig. 2).

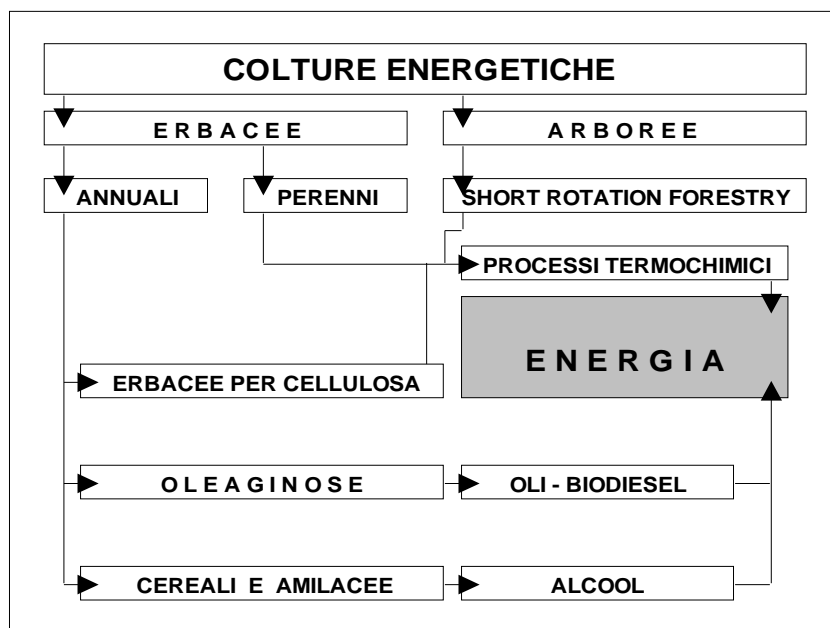


Figura 2: Colture dedicate da biomassa : diversi scenari produttivi e di trasformazione

Come rappresentato in figura 2, si possono definire colture energetiche moltissime produzioni vegetali, che possono poi seguire vie di trasformazione diverse a seconda delle caratteristiche del prodotto.

Colture arboree da biomassa

La selvicoltura a breve rotazione (Short Rotation Forestry - SRF) è un innovativo metodo che consiste nella ceduzione totale dell'impianto arboreo ad intervalli più ravvicinati rispetto alla tecnica tradizionale di conduzione del bosco o dell'arboreto. La densità dell'impianto varia dalle 8.000 alle 20.000 piante ha⁻¹. Si effettua un taglio ogni 1 – 4 anni a seconda delle tecniche d'impianto e delle specie. La durata dell'impianto va valutata di caso in caso a seconda delle caratteristiche ambientali e delle scelte varietali. Le specie utilizzate sono tutte a rapida crescita, si ricordano il pioppo, la robinia, l'eucalipto e il salice.

Colture erbacee da biomassa

ANNUALI:

Il vantaggio delle colture annuali è quello di occupare il terreno per un solo anno riducendo il vincolo sull'area coltivata. Sono facilmente inseribili nelle rotazioni tradizionali. Molte specie sono già coltivate a scopo alimentare o per altri settori no-food, fra le più importanti si ricordano le oleaginose per la produzione di biodiesel (e.g. colza, girasole), le specie che producono amidi o zuccheri per la produzione di Etanolo (e.g. mais, frumento, barbabietola) e le lignocellulosiche per la produzione di elettricità, calore e biocarburanti di seconda generazione.

POLIENNALI:

Le specie poliennali o perenni, pur essendo meno flessibili delle precedenti nell'organizzazione aziendale, sono interessanti per via dei bassi costi di gestione. Se si eccettua il primo anno, dove si presentano costi elevati dovuti alle spese d'impianto, che comunque vengono ripartiti in diversi anni produttivi, le perenni, grazie alla loro rusticità, presentano costi gestionali bassissimi.

La minor richiesta di lavorazioni si traduce anche in un minor impatto ambientale;

inoltre l'utilizzo di tali piante riduce anche l'erosione dei suoli (il terreno viene lavorato solo il primo anno e gli apparati radicali sviluppano di più rispetto alle annuali). Fra le specie poliennali ad oggi destano particolare interesse soltanto le specie per la produzione di biomassa lignocellulosica.

Caratteristiche qualitative della biomassa

La qualità della biomassa è determinata da tre fattori principali: umidità, potere calorifico e contenuto di ceneri. L'umidità è importante perché incide sui costi di trasporto e può creare problemi di stoccaggio dovuti all'innescio di processi fermentativi con perdita di biomassa. Inoltre, come illustrato in precedenza, l'umidità è un fattore limitante per alcuni dei principali processi termochimici.

Il potere calorifico inferiore è importante ai fini dell'efficienza dell'impianto: maggiore è il potere calorifico di un materiale, maggiore sarà il suo rendimento energetico, di conseguenza sarà anche più conveniente il trasporto (più energia per unità di volume).

Tabella 1: Potere calorifico inferiore (PCI) di diversi tipi di biomassa da diversi settori e confronto con i valori di altre tecnologie (FONTE: APEAC 2007)

<i>Tipologie di biomasse</i>	<i>Potere calorifico medio (MJ kg⁻¹ sostanza secca)</i>
Lignocellulosiche dedicate (media)	17,25
Ramaglie cedue di valore	17,18
Altri cedui: tutta la produzione	16,76
Scarti da fustaie resinose	17,60
Scarti da fustaie latifoglie	17,18
Cure forestali castagneti	16,76
Materiale potature vigneti	18,02
Materiale potature oliveti	17,60
Materiale potature frutteti-vivai	18,02
Recupero paglia	16,55
Biorifiuti-potature urbane	16,55
Biorifiuti-erba fresca	2,41
Biorifiuti foglie secche	18,17
Scarti lavorazione legno	17,18
<i>Dati di confronto</i>	
Rifiuti solidi urbani (inorganici)	10,48
22 Carbone	31,01
Petrolio greggio	41,90

La presenza di ceneri, soprattutto silicati e composti clorati, rappresenta ad oggi il maggior ostacolo tecnologico nel processo di trasformazione termoelettrica delle biomasse erbacee: un contenuto di ceneri elevato aumenta i costi di manutenzione dell'impianto e i tempi morti nella lavorazione, riducendo così l'efficienza dell'impianto stesso. Inoltre i sali e gli alcali presenti nelle ceneri possono danneggiare alcune componenti meccaniche (es. turbine) e compromettere il funzionamento delle macchine.

Il contenuto in ceneri della biomassa dipende dall'epoca di raccolta, dal rapporto fra le componenti della biomassa (foglie, steli e organi fiorali), e dalla presenza di elementi minerali nel terreno. Una specie erbacea od arborea per essere idonea a diventare una coltura da biomassa deve avere alcuni requisiti agronomici fondamentali:

- elevata produzione di sostanza secca
- bassi input di coltivazione;
- stabilità di produzione nel tempo;
- adattabilità e tolleranza a stress biotici e abiotici (rusticità);
- adattabilità a strutture e mezzi aziendali tradizionali;
- eco-compatibilità (bassa lisciviazione dei nitrati, riduzione dell'erosione, etc.)
- produzione di biomassa di qualità idonea agli impianti

Un ulteriore problema da tenere in considerazione è la necessità da parte dell'industria di reperire materia prima abbastanza omogenea come dimensioni. Per



ovviare a questo problema la biomassa può essere pretrasformata in pellet o in cippato. I pellet sono prodotti a partire dalla “segatura” generata dalla sfibratura di residui legnosi o cellulosici,

la quale viene pressata da apposite macchine che la stabilizzano in cilindretti che possono avere diverse lunghezze e spessori. La compattezza, la



maneggevolezza e la facilità di stoccaggio e commercializzazione rendono questa tipologia di combustibile molto appetibile, grazie anche all'alto potere calorifico (P.C.I. 4.000-4.500 kcal/kg). Il cippato (dall'inglese chips = frammenti) si ottiene dalla frammentazione del materiale vegetale mediata da apposite macchine. E' un ottimo combustibile ed ha potere calorifico simile al pellet, tuttavia non essendo pressato, ha una densità nettamente inferiore a quest'ultimo, con conseguenti limiti di trasporto soprattutto su lunghe distanze.

COLTURE IN ESAME

POLIENNALI:

CANNA COMUNE

Arundo donax L.



Figura 3. Arundo donax L. (Canna Comune)

Classificazione, morfologia e caratteristiche botaniche:

Volgarmente chiamata Arundo, canna comune (inglese: giant reed), questa graminacea appartiene alla sottofamiglia delle *Arundinoideae*.

La canna comune è una pianta erbacea C_3 che si sviluppa molto in altezza fino a raggiungere 8-9 m, con crescite settimanali di 30-70 cm in condizioni favorevoli (Purdue, 1958).

Gli steli si sviluppano da grossi rizomi sotterranei durante la stagione vegetativa,

ma non emergono tutti contemporaneamente, bensì scalarmente durante il ciclo. I rizomi hanno dimensioni molto variabili tra loro, da poche centinaia di grammi fino ad oltre 80 Kg e penetrano il suolo fino a 50 cm di profondità; da essi dipartono le radici che arrivano fino ad oltre 2 m nel sottosuolo (Sharma *et al.*, 1998).

Il fusto è glabro e presenta un'alta percentuale di silicio che lo rende assai rigido; il suo diametro può superare i 4 cm, soprattutto nei culmi emessi verso fine maggio. È ripartito in nodi che sono posizionati nella pianta adulta a circa 30 cm l'uno dall'altro.

L'infiorescenza, lunga 30-40 cm, è una spiga e appare da agosto a novembre sulla cima della pianta; non tutti i culmi fioriscono lo stesso anno. La spiga porta numerose spighe di 8-16 cm con ciascuna 2-7 fiori ermafroditi.

In bibliografia è riportato che la canna comune si riproduce solo per via asessuata, in quanto i semi prodotti risultano sterili a causa dell'incapacità di divisione delle cellule della megaspore in fase di gametogenesi (Lewandowski *et al.*, 2003).

Le foglie, che si dipartono da ogni nodo, sono di notevole estensione (30-70 x 5-8 cm) (Duke, 1983) e con nervature parallele.

L'*Arundo donax* si adatta a diverse condizioni climatiche, ma preferisce suoli ben drenati, con disponibilità idrica, in cui non si presentino condizioni asfittiche, indipendentemente dalla tipologia della matrice (argillosa, sabbiosa ecc.). È abbastanza tollerante la salinità e classificata come mesofita o quasi xerofita grazie alle riserve idriche dei rizomi, il che la colloca tra le piante che possono essere coltivate in terreni poco vocati all'agricoltura "convenzionale", senza subirne conseguenze negative. Risulta essere poco sensibile al freddo invernale, ma subisce pesantemente le gelate in fase vegetativa (Perdue, 1958).

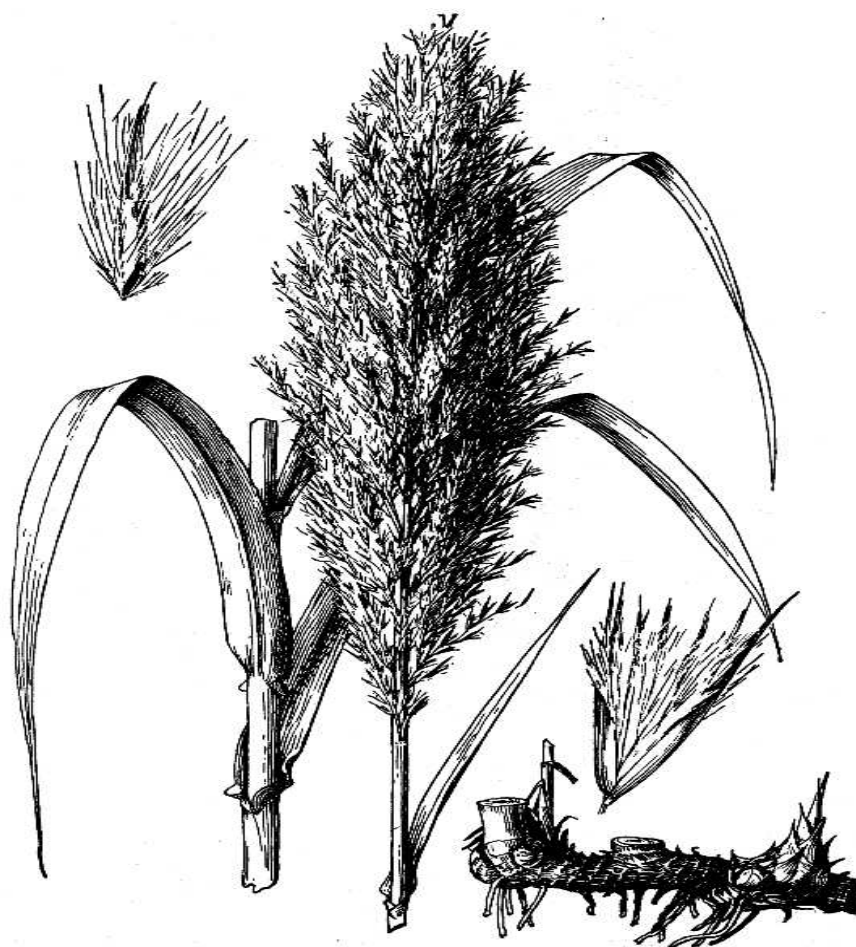


Figura 4: Tavola botanica *Arundo donax* L.

Caratteristiche genetiche e genotipi:

L'arundo diffuso in Europa e Asia ha un corredo cromosomico $2n = 110$; la selezione genetica di questa specie non è praticamente mai decollata. Da analisi del polimorfismo del DNA (RAPD) è risultato che in ogni area geografica si sono lievemente adattati degli ecotipi che tuttavia non sono molto diversi tra loro. I genotipi diversificati più noti sono *Arundo donax* var. *variegata*, var. *picta*, var. *versicolor* (Lewandowski *et al.*, 2003).

Tecniche colturali e potenzialità produttive

L'arundo necessita di una buona preparazione del terreno per poter ottenere un'emergenza uniforme e per dar la possibilità ai rizomi di espandersi. Normalmente si esegue un'aratura a media profondità seguita dalle operazioni di

affinamento del terreno (estirpatura, erpicatura etc.) che possono essere meno accurate rispetto a quelle necessarie per colture propagate per seme.

L'impianto è il momento più critico di tutto il ciclo in quanto il materiale di propagazione ha un'elevata incidenza sul bilancio economico della coltura. È importante stabilire da subito quale sarà la densità dell'impianto e quindi la quantità di rizomi da impiegare. Sono state effettuate prove in campo con sesti d'impianto di 50x80, 100x100 e 70x150 cm. E' risultato che con maggiori densità le piante diventano più alte ma con un fusto molto più sottile per l'elevata competizione, ed è quindi più conveniente utilizzare la densità minore (circa 10.000 piante/ha).

Oltre alla classica propagazione vegetativa per questa specie sono state fatte delle prove di micropropagazione che, sebbene abbiano dato risultati incoraggianti, non hanno mai preso piede in quanto risulta più facile, per ora, trapiantare direttamente i rizomi. Se il materiale genetico è in buono stato fitosanitario e presenta numerose gemme, si possono anche avere attecchimenti prossimi al 100% (Lewandowski *et al*, 2003).



Figura 5. Rizoma di *Arundo donax* L.

Se a seguito di analisi del terreno questo risultasse scarso in fosforo e potassio è

bene apportare tali elementi mediante concimazioni preimpianto. Per quanto riguarda l'azoto, sono state effettuate prove con 40 e 120 kg/ha in cui si è notato un incremento di solo 1 t/ha di sostanza secca, almeno per i primi anni produttivi, per cui non conviene esagerare, bensì apportare dosi ridotte di tale elemento (Christou *et al.*, 2001). Dopo il quinto - sesto anno dall'impianto la concimazione azotata sembra assumere un ruolo più importante sulla resa del prodotto, dosi di 90-100 kg/ha sembrano soddisfare comunque le esigenze della coltura (dati DiSTA non pubblicati).

Questa specie sopravvive bene anche in climi semi aridi ma una, seppur parziale, restituzione idrica fa ottenere una rapida risposta della pianta nella produzione di biomassa; gli appezzamenti irrigati risultano avere una maggior densità e quindi utilizzano al massimo la superficie disponibile (Christou *et al.*, 2001). Le colture irrigate raggiungono la massima produttività già dal secondo anno, mentre “in asciutta” la raggiungono solo dopo il terzo anno. In generale, pertanto, la coltura della canna comune è ottimizzata da un regime minimo di restituzione idrico, necessario soprattutto in zone dal clima semiarido e arido; per favorire una buona espansione del rizoma anche in climi temperati può aver senso praticare un'irrigazione durante il primo anno d'impianto.

La raccolta può essere effettuata una o due volte l'anno dove il clima è più mite ma è bene non aumentare la frequenza di raccolta poiché nel lungo periodo si depauperano le riserve contenute nei rizomi e la produttività cala (Sharma *et al.*, 1998).

Negli areali sud europei è consigliata la raccolta a fine inverno, quando il contenuto di umidità nel culmo risulta essere inferiore al periodo post-invernale.

Ad oggi il prodotto si raccoglie mediante falcia-trincia-caricatrici di potenza elevata, tuttavia si stanno sperimentando macchine per il condizionamento e l'imballatura.

Questa specie è in grado di produrre dal 2°-3° anno di impianto oltre 100 t/ha di sostanza fresca se le condizioni climatiche e le disponibilità idriche lo permettono

(Shatalov e Pereira, 2001). In paesi come Spagna e Grecia, in regime irriguo, si sono raccolte 40-60 t/ha di sostanza secca, per la maggior parte costituita dai culmi (Hidalgo e Fernandez, 2001). Occorre sottolineare il fatto che queste produzioni si sono ottenute da materiale non selezionato geneticamente, e in un futuro con un buon lavoro di selezione, si possono ipotizzare ulteriori incrementi, anche significativi della biomassa prodotta da tale coltura, ed ipotizzare produzioni simili anche in asciutta in areali centro europei. (Lewandowski *et al*, 2003).

SWITCHGRASS

Panicum virgatum L.



Figura 6. *Panicum virgatum* o switchgrass

Classificazione, morfologia e caratteristiche botaniche

Lo Switchgrass o Panico vergato è stato classificato da Linneo come appartenente alla famiglia delle Poaceae (sottofamiglia Panicoideae).

Lo switchgrass è una specie C_4 ad habitus cespuglioso. I culmi hanno internodi cavi di colore verde-rossastro intervallati da 5-7 nodi, di diametro variabile da 1 a 8 mm e altezza massima da 0,5 a 2,5 m. L'infiorescenza è un panicolo aperto che può misurare da 15 a 45 cm di lunghezza, con spighe nella parte terminale del culmo. Nelle spighe si trovano due tipi di fiore, di cui solo uno fertile. Le foglie, con venature parallele ben visibili, hanno una larghezza di circa 1 - 2 cm e una lunghezza di 20 - 30 cm.

Le ligule sono cigliate e membranose, di lunghezza 1,5 – 3,5 mm e tomentose. Il seme è piatto e ovale longitudinalmente, con glume di diversa dimensione, piccolo

di peso variabile tra gli 0,7 e i 2 mg a seconda della varietà. Il sistema radicale è di tipo rizomatoso: prende origine dalla corona posta sotto il colletto ed è costituito da diverse radici avventizie. L'apparato radicale si estende fino a 3 m di profondità, anche se la maggior parte delle radici si trovano entro i primi 30-35 cm. Il peso delle radici varia in funzione del genotipo, del tipo di terreno e della tecnica colturale; recenti esperienze hanno mostrato valori da un minimo di 2.500 ad un massimo di 18.500 kg ha⁻¹ (Parrish *et al.*, 1997 Christian e Elbersen, 2001; Moser e Vogel, 1995).

I semi sono generalmente caratterizzati da un alto livello di dormienza che può essere interrotta anche mediante vernalizzazione, anticipando le semine in periodi freddi e umidi (Moser e Vogel, 1995). Negli ultimi anni sono state selezionate nuove varietà aventi semi con livello di dormienza ridotto.

Lo sviluppo delle radici avventizie (dette anche secondarie) dipende dalle condizioni idriche del terreno; al di sotto di una soglia limite di umidità del terreno può accadere che le radici secondarie non si sviluppino compromettendo totalmente il successo dell'impianto (Moser, 1988), così come l'eccessiva disponibilità idrica può avvantaggiare le infestanti. Il panico infatti nelle fasi iniziali di sviluppo è scarsamente competitivo nei confronti delle infestanti (Taliaferro e Hopkins, 1997).

Caratteristiche genetiche e genotipi

Il panico è una pianta estremamente polimorfa ed autoincompatibile. In base alle caratteristiche morfologiche e all'areale di origine si distinguono due ecotipi: Lowland e Upland. Il primo cresce come pianta spontanea nelle pianure alluvionali degli Stati Uniti, è caratterizzato da culmi più alti e grossi, ha una maggiore rusticità e velocità di sviluppo (pur avendo un ciclo più lungo). Rispetto ai tipi Upland il portamento è più eretto e meno soggetto ad allettamento; la produzione di sostanza secca è generalmente più elevata (Moser e Vogel, 1995; Hulquist *et al.*, 1996.).

Ciascuno dei due ecotipi è poi ulteriormente suddiviso in Southern e Northern, in base alla latitudine di origine; recenti studi hanno evidenziato che l'ecotipo Southern ha ciclo più lungo e, se coltivato a latitudini settentrionali, non arriva a completare il ciclo riproduttivo. Analogamente, l'ecotipo Northern se coltivato a latitudini meridionali può avere problemi di germinazione, ma se riesce ad insediarsi, accorcia il ciclo (Taliaferro, 2002).

Gli ecotipi Lowland hanno sempre mostrato una maggior produttività rispetto agli Upland, con rese da due a tre volte superiori. Le varietà Upland potrebbero raggiungere rese simili ai tipi Lowland solo con un'eventuale gestione a due tagli annuali (Taliaferro, 2002). Fra le varietà più note "Alamo" (Lowland) ha ottenuto le maggiori produzioni di biomassa (Parrish *et al.*, 2003).

Da un punto di vista qualitativo gli ecotipi Upland e Northern tendono ad avere un residuo in ceneri maggiore rispetto ai Lowland e Southern questo potrebbe essere spiegato da un adattamento climatico ai climi più rigidi, essendo un maggior contenuto di sali nel fusto proporzionale alla tolleranza della pianta al gelo (Ocumpaugh *et al.*, 2003).

Tecniche colturali e potenzialità produttive

Lo Switchgrass necessita di una buona preparazione del letto di semina per ottenere una germinazione uniforme. Solitamente si esegue un'aratura a media profondità seguita da operazioni di affinamento del terreno (estirpatura, erpicatura etc.). Le linee guida americane suggeriscono la non-lavorazione (no-tillage) o la minima lavorazione (minimum tillage) soprattutto nei terreni collinari, al fine di ridurre i fenomeni di erosione superficiale e i costi (R.E.A.P. Canada, 2004; Monti *et al.*, 2001).

La semina viene effettuata mediante seminatrice meccanica tradizionale o di precisione. Nelle regioni mediterranee lo switchgrass viene normalmente seminato da metà aprile a metà maggio, quando la temperatura del terreno è attorno a 10°C.

La temperatura minima per la semina è comunque variabile (5-12°) a seconda del genotipo utilizzato. Semine anticipate consentono di ridurre la dormienza dei semi, aumentare il numero di eventi piovosi per la coltura e ampliare la durata del ciclo colturale (Moser e Vogel, 1995; Smart e Moser, 1997; Vassey *et al.*, 1985). Viste le ridotte dimensioni del seme, vanno evitate profondità di semina superiori a 3 cm. In alcuni casi una rullatura sia prima che dopo la semina può favorire l'emergenza (Monti *et al.*, 2001; Miller e Owsley, 1994).

La distanza tra le file è molto importante e può influenzare la produttività dello Switchgrass (Ocumpaugh *et al.*, 1997). In letteratura è comunemente raccomandata una distanza tra 15 e 20 cm. File così vicine consentono di anticipare il raggiungimento della completa copertura del terreno, riducendo la competizione delle malerbe. Per contro, interfile ridotte aumentano la competizione individuale con minor diametro dei culmi e conseguente maggior allettamento della coltura (Ocumpaugh *et al.*, 1997). Se mantenuto in buone condizioni, un impianto di Switchgrass realizzato opportunamente può durare fino a 20 anni, con massima produttività a partire dal 2° - 4° anno. Tempi maggiori occorreranno se l'impianto è collocato in terreni freddi e umidi (Myers e Dickerson, 1984; Elbersen, 1998).

La fase d'impianto può dirsi conclusa con successo quando le piante hanno 4 foglie ed almeno 2 radici secondarie di almeno 8 cm (Ries e Svejcar, 1991).

Lo Switchgrass è una pianta che si avvantaggia molto della disponibilità di azoto perché è molto efficiente nell'utilizzo di tale nutriente ed è in grado di raggiungere produzioni apprezzabili anche a bassi livelli di altri input agronomici. Dal secondo anno (evitare concimazioni azotate all'impianto) è necessario provvedere alla somministrazione di una quota di azoto calcolabile dal bilancio fra apporti (mineralizzazione, pioggia, residui colturali, etc.) e asportazioni (lisciviazione, assorbimento etc.). In maniera semplificata si ritiene che un apporto di 50 – 100 kg ha⁻¹ di azoto possa essere sufficiente in zone con precipitazioni annue di 500 - 750 mm. Dosi di azoto più elevate non determinano in genere aumenti significativi della produzione mentre possono provocare un incremento sostanziale di infestanti

e un'eccessiva lisciviazione in falda (Moser e Vogel, 1995; Turnhollow *et al.*, 1991). In terreni sabbiosi è richiesto un aumento dell'apporto consigliato di N di circa 25%.

La concimazione fosfo-potassica non sembra avere effetti produttivi significativi. Nei casi di scarsa dotazione del terreno è consigliabile una somministrazione di 100 kg ha⁻¹ di P₂O₅ (Muir *et al.*, 2001).

L'apporto idrico si rende necessario in fase di impianto se il periodo di semina risulta particolarmente siccitoso. Nell'anno d'impianto l'irrigazione potrebbe anche rivelarsi utile nel favorire un più rapido sviluppo delle radici secondarie. Occorre però ricordare che un eccesso idrico durante il primo anno potrebbe determinare uno sviluppo radicale superficiale ostacolando l'approfondimento delle radici, esponendo così la pianta a stress idrici nell'annata successiva (Moser e Vogel, 1995).

Dal secondo anno, l'irrigazione non risulta normalmente necessaria, in quanto la pianta ha un apparato radicale che si sviluppa molto in profondità (fino a 3 metri). Tuttavia in caso di gestione dell'impianto con tecniche a due tagli annuali, l'irrigazione post-raccolta nel periodo estivo può favorire e velocizzare il ricaccio della coltura (Moser e Vogel, 1995).

La raccolta del *Panicum* può essere effettuata con macchine tradizionali comunemente impiegate per la raccolta delle foraggere come falciatrici tradizionali o falcia-condizionatrici rotative (Christian e Elbersen, 1998). Il momento di raccolta può essere variabile: lo Switchgrass possiede infatti culmi piuttosto sottili, se paragonato ad altre colture da biomassa (ad es. *Arundo donax*, *Miscanthus* etc), che favoriscono la perdita di umidità del prodotto sfalciato consentendo una più ampia finestra di raccolta e la possibilità dell'essiccazione in campo, seguita dall'imballatura (raccolta autunnale).



Figura 8. Roto-imballatura dello switchgrass

Se la raccolta è invece invernale o post-invernale il clima non consente la sosta del prodotto in campo (per contro, normalmente, la biomassa ha già un contenuto di umidità inferiore al 30%). In questo caso le operazioni di raccolta vengono condotte nello stesso momento una di seguito all'altra. La raccolta invernale viene effettuata allo scopo di lasciare seccare la pianta in piedi per massimizzare l'accumulo di biomassa, ridurre il contenuto di umidità e ceneri nei culmi dovuto alla traslocazione dei metaboliti nei rizomi che promuoverà il ricaccio in primavera. Eventuali contaminazioni del prodotto (terreno, sporcizia, etc.) aumentano il contenuto di ceneri e alcali, peggiorando considerevolmente la qualità del materiale (McLaughlin *et al.*, 1996).

Le produzioni parcellari di impianti giovani in piena produzione (dal terzo anno) superano le 20 t ha^{-1} di sostanza secca in pianura, mentre in terreni di collina non particolarmente fertili si superano le 10 t ha^{-1} . È da notare che nel passare dalla raccolta parcellare al pieno campo, per questa ma ancor più per altre specie da biomassa (es. arundo), il calo di produttività può essere molto consistente e dovuto a varie cause, quali ad esempio disomogeneità degli appezzamenti o malfunzionamento delle macchine. Nel caso del panico sono state osservate perdite fino al 30% di biomassa potenzialmente ottenibile in condizioni parcellari (Monti *et al* 2009).

MISCANTO

(Miscanthus sinensis x giganteus Greef et Deuter)



Figura 9. Miscanthus sinensis x giganteus

Classificazione, morfologia e caratteristiche botaniche

Il genere *Miscanthus* appartiene alla famiglia delle Graminacee, è composto da 17 specie che derivano dall'estremo oriente, dove si è sviluppato ed evoluto in ambienti con caratteristiche climatiche assai eterogenee (Greef and Deuter, 1993).

Il miscanto è una graminacea C₄ ad alta efficienza d'uso di acqua e luce. Anche questa specie, come l'*Arundo*, presenta dei rizomi caratteristici a seconda della varietà. Le foglie sono sottili ed allungate, con nervature parallele e sono di consistenza molto rigida per l'elevato contenuto di silicio che le fa diventare taglienti come dei rasoi.

L'infiorescenza è un panicolo allungato e l'impollinazione dei fiori è di tipo

anemofila. Gli ibridi *Miscanthus X giganteus* possono arrivare a 4m di altezza, l'impianto può avere una durata superiore a 25 anni (Lewandowski *et al*, 2003).

I semi prodotti da queste piante sono sterili; questa è una caratteristica positiva in quanto sono impediti eventuali dispersioni accidentali nell'ambiente, che trasformerebbero un'interessante coltura da biomassa in un'indesiderabile e tenace infestante.

Il rizoma della pianta inizia a vegetare quando la temperatura del suolo si aggira attorno ai 10-12 °C, mentre le foglie iniziano ad accrescersi già a 5-10 °C. Questi fusti sotterranei risultano danneggiarsi irrimediabilmente se le temperature invernali nel terreno scendono sotto -3,5 °C (Lewandowski *et al*, 2003).

Caratteristiche genetiche e genotipi

Il genotipo maggiormente utilizzato in Europa per le prove di produzione biomassa è l'ibrido intragenerico triploide *Miscanthus sinensis x giganteus* con corredo cromosomico n=57, introdotto dal Giappone alla Danimarca, da cui si è diffuso in Europa.

Altre specie come il *M. sinensis* e *M. sacchariflorus* vengono allevate negli areali più freddi in quanto sono abbastanza tolleranti alle basse temperature (sopportano bene temperature prossime a -6,5 °C) (Lewandowski *et al*, 2003). Queste due specie presentano fusti più affusolati e in linea di massima, una produttività media inferiore rispetto all'ibrido precedentemente citato.

Tecnica colturale e potenzialità produttive

Una coltura di miscanto può fornire 15-30 t di sostanza secca (Lewandowski *et al*, 2003) a seconda degli areali di coltivazione.

In linea di massima la biomassa prodotta da queste piante tende ad avere quantità elevate di ceneri e sostanze minerali che rappresentano un problema durante la trasformazione termochimica; per questo motivo bisogna porre molta attenzione alle pratiche colturali che influiscono su tali aspetti (epoca di raccolta,

concimazioni).

L'ibrido sterile *Miscanthus x giganteus* viene propagato esclusivamente per via vegetativa tramite l'interramento dei rizomi, operazione che può essere chiamata anche macropropagazione. Si sta sviluppando anche la micropropagazione mediante coltura in vitro dei tessuti e se, grazie alla continua ricerca, si riuscissero ad abbassare i costi di tale operazione, potrebbe diventare una valida alternativa alla classica macropropagazione.

L'aratura e il conseguente affinamento del terreno sono sempre raccomandati prima di trapiantare il miscanto, operazione da effettuare al termine del periodo freddo, infatti questo ibrido risente molto delle basse temperature invernali ($<-3,5^{\circ}\text{C}$). La densità ottimale d'impianto è 1-2 piante/m² (Lewandowski *et al*, 2003); un'irrigazione è raccomandabile durante le prime fasi di impianto per favorire l'emergenza e la crescita delle piante. In media servono 3-5 anni per entrare in piena produzione.

Il *Miscanthus* non risponde in maniera significativa ad elevati apporti di azoto, seppure abbia una risposta alla concimazione azotata più alta rispetto alle altre graminacee poliennali. Risulta agronomicamente corretto reintegrare 2 – 5 kg di N (70-150 kg/ha), 0,3 – 1,1 kg di P, 0,8 – 1,2 kg di K, 0,8 – 1 kg di Ca, ogni t di sostanza secca raccolta (Lewandowski *et al*, 2003).

Il controllo delle malerbe in fase d'impianto è molto importante, poiché in questi momenti il *Miscanthus* non riesce a competere con le infestanti e ne sarebbe facilmente sopraffatto. Per tale operazione si possono utilizzare numerosi erbicidi del mais o di altri cereali (Serafin e Ammon, 1995), in quanto non esistono ancora erbicidi registrati per tale coltura.

Per quel che concerne malattie o parassiti, ad oggi non ne sono stati individuati di particolarmente impattanti.

Il *Miscanthus* viene raccolto una sola volta all'anno, poiché più tagli consecutivi durante lo stesso ciclo impoveriscono il rizoma, fino al deperimento della pianta. Nei climi caldi del sud Europa come in Portogallo si registrano produzioni di

sostanza secca che si aggirano attorno a 30 t/ha, mentre in regioni meno calde si producono in un ettaro circa 10-25 tonnellate di sostanza secca (Lewandowski *et al.*, 2000).

Nei nostri areali questa pianta viene raccolta a fine inverno, in modo che tutti gli elementi come il cloro e il potassio siano stati trasferiti nel rizoma e venga di conseguenza ridotta la percentuale di ceneri che si produrrà a valle della trasformazione termica. Bisogna altresì ricordare che se si ritarda troppo la raccolta si possono perdere percentuali considerevoli di biomassa in campo.

CARDO

(*Cynara cardunculus* L.)



Figura 10. *Cynara cardunculus* L.

Classificazione, morfologia e caratteristiche botaniche

Questa dicotiledone appartiene alla famiglia delle *Asteraceae*, è una pianta perennante nativa delle regioni Mediterranee, nelle quali si è ampiamente diffusa come pianta selvatica e come specie coltivata.

C. cardunculus si è molto ben adattato al clima Mediterraneo e quindi alle aride estati e alle scarse precipitazioni annuali. Per superare il periodo estivo di massima siccità la pianta completa il ciclo annuale all'inizio dell'estate per lasciare che la parte epigea della pianta si secchi, mentre quella ipogea resta vitale, in attesa che le condizioni avverse cessino (Fernandez *et al.*, 2006).

Ha una crescita molto vigorosa, una sola pianta può raggiungere l'altezza di 3 m e coprire un'area dal diametro di 1,5 m, per questo ed altri motivi è una pianta interessante per la produzione di biomassa (Fernandez, 1990; Fernandez and Manzanares, 1990a,b).

Le foglie si sviluppano da una rosetta man mano che la pianta cresce, presentano numerose spine che le rendono difficilmente manipolabili od edibili. In tarda

primavera vengono emesse delle ramificazioni che portano i fiori (numerosi per ogni pianta); alla maturazione dei frutti la pianta inizia a disseccarsi, tranne le gemme perennanti basali che inizieranno a germinare al cessare della stagione secca.

Tecnica colturale e potenzialità produttive

Se lo scopo è la destinazione industriale, è bene coltivare questa pianta negli areali in cui si trova anche a crescere in natura, per poter sfruttare al massimo l'effetto ambientale ed ottenere un prodotto già perfettamente essiccato in campo.

Per quel che concerne la longevità, Questa coltura può fornire una produzione interessante anche per 15 anni consecutivi di impianto (Fernandez and Curt, 2005).

La preparazione del terreno per questa coltura deve essere scrupolosa, si inizia con un'aratura profonda (40-50 cm), per poi proseguire con l'affinamento mediante erpici. Nei terreni più sabbiosi le lavorazioni possono essere meno intensive per via della minor ritenzione idrica.

I semi germinano a temperature dai 15 ai 25 °C, per questo motivo vengono messi a dimora ad inizio autunno o in tarda primavera nelle regioni mediterranee; questa seconda opzione è raccomandabile nelle regioni in cui si presentano spesso gelate autunnali. La semina autunnale deve essere effettuata in modo che si riesca a formare una resistente rosetta di foglie prima che giunga l'inverno.

La distanza di semina è di 80 cm o più tra le file e lungo le file, con un investimento di circa 10000-15000 piante per Ha a seconda della potenzialità del suolo e delle caratteristiche climatiche, in condizioni sfavorevoli è bene non superare 7500 piante per Ha. La quantità di semi richiesta per coprire un Ha è di circa 3-4 kg con densità medie (Fernandez J. *et al.*, 2006).

Come per ogni coltura poliennale è raccomandata una buona concimazione di fondo all'impianto interrando in profondità anche sostanza organica se possibile, visto che il cardo sviluppa delle radici molto profonde. In terreni molto poveri è bene apportare concimi complessi con titolo 9:18:27 in ragione di 1 t per ettaro

(Fernandez J. *et al.*, 2006). Dal secondo anno d'impianto, è necessario reintegrare i nutrienti in relazione alla quantità di biomassa asportata dal raccolto annualmente; studi effettuati in Spagna hanno evidenziato che produrre 1 t di sostanza secca depaupera il suolo di 12,6 kg di N, 3,5 kg di P, 20,8 kg di K (Fernandez J. *et al.*, 2002).

Il diserbo è importante soprattutto il primo anno d'impianto, effettuato con prodotti chimici o mediante sarchiatura, per avvantaggiare il Cardo rispetto le malerbe. Negli anni seguenti non è generalmente richiesto alcun trattamento perché le foglie della rosetta si sviluppano più velocemente rispetto alle infestanti.

Il *C. cardunculus* è una specie molto resistente alle malattie e ai parassiti, ma occasionalmente può essere colpita da afidi, minatori fogliari, o bruchi fillofaghi, per questo è bene osservare la coltura periodicamente, soprattutto in tarda primavera e se necessario utilizzare insetticidi sistemici. In condizioni climatiche particolarmente umide a seguito di traumi subiti dalle piante si possono instaurare delle muffe grigie, eradicabili mediante i numerosi formulati in commercio (Fernandez J. *et al.*, 2006).

La raccolta si effettua una volta l'anno, quando il ciclo annuale è finito, ma prima che la pianta rilasci i semi. In questa fase la pianta ha un contenuto di umidità inferiore al 15%. La raccolta avviene mediante falcia-trincia-caricatrici; in Spagna si sperimentano macchine semoventi, costituite da tamburi falcianti seguiti da una rotoimballatrice, ma spesso la biomassa risulta essere contaminata da particelle del suolo.

Se la coltura avviene in zone dove le precipitazioni sono circa 500 mm all'anno si producono 10-20 t/ha (Fernandez J., 1993, 1998 b). A seguito di sperimentazioni poliennali si è potuta calcolare una produttività media, in 10 anni con precipitazioni molto eterogenee, di circa 14 t/ha di S.S. (Fernandez *et al.*, 2005), in alcuni casi si sono registrate produzioni di 30 t/ha di S.S. (Dalianis *et al.*, 1994, 1996; Foti *et al.*, 1999), negli areali nord italiani la coltura raggiunge livelli produttivi molto più limitati (5-10 t/ha) (DiSTA dati non pubblicati).

La biomassa prodotta da questa coltura può avere diverse applicazioni industriali tra cui l'utilizzo come combustibile solido, l'estrazione di olio dai semi, la produzione di fibra per l'industria cartaria o come materia prima da cui ricavare composti farmaceutici.

COLTURE ANNUALI

SORGO DA FIBRA

Sorghum bicolor L. Moench



Figura 11. Sorghum Bicolor L.

Classificazione, morfologia e caratteristiche botaniche

Appartenente alla famiglia delle *Poaceae* il genere *Sorghum* viene suddiviso sulla base dell'appaiamento cromosomico in 6 sottogeneri tra cui *Eusorghum* che comprende *Sorghum bicolor* L., all'origine dei sorghi da granella e da biomassa.

Specie annuale a ciclo fotosintetico C_4 particolarmente adatta ad ambienti siccitosi in quanto dotata di un apparato radicale di tipo fascicolato molto espanso e ramificato con capacità di assorbimento superiori al mais.

Il culmo si origina da una corona composta da 5-6 nodi molto ravvicinati, ciascuno con un palco di radici. Il culmo è eretto e robusto, alto fino a 5-6 metri (mediamente 3-4), contenente zuccheri riducenti da un minimo del 5-6% nei tipi da fibra, fino al 14-16% in quelli da zucchero, concentrati nel midollo centrale. Dai nodi basali si forma un numero variabile di culmi di accestimento, in funzione del genotipo e della densità, che la pianta tende a perdere durante il ciclo. Le foglie

vanno da 14-16 (fibra) a più di 20 (zuccherino), con lunghezza superiore al metro. L'infiorescenza (panicolo) è un racemo composto situato all'apice del culmo di dimensioni inferiori rispetto ai sorghi da granella nelle varietà da fibra mentre nei tipi zuccherini è ancora più ridotto per evitare l'eccessivo accumulo di carboidrati, a scapito del culmo. Dal rachide dell'infiorescenza si sviluppano ramificazioni di primo e secondo ordine, su cui si inseriscono coppie di spighette di cui una sessile e fertile, l'altra pedunculata e sterile (Baldoni, 2000).

Caratteristiche genetiche e genotipi

I materiali genetici più utilizzati sono ibridi con ciclo da 120-150 giorni, ottenuti dall'incrocio di linee maschiosterili da granella con linee da saggina, che ne esaltano il vigore vegetativo.

Tecniche colturali e potenzialità produttive

Il seme è piuttosto piccolo (20 - 40 mg) e con modesto vigore; necessita quindi di una preparazione abbastanza accurata del letto di semina, non necessariamente di una lavorazione profonda. L'aratura a media profondità (25-30 cm) rimane la lavorazione più comune, ma le lavorazioni medio-superficiali (10-25 cm) senza inversione della zolla (dischi, denti) e la non lavorazione (sod-seeding) possono risultare valide alternative. Il successivo affinamento del letto di semina va perseguito tenendo conto delle opposte esigenze di pulizia dalle erbe infestanti e di conservazione dell'umidità superficiale.

La semina dovrebbe aver luogo con temperature del terreno di 10-15 °C, onde permettere una rapida emergenza. Il periodo corrispondente (centro-nord Italia) è la seconda metà di aprile, ma semine più tempestive (prima metà di aprile) vengono sovente effettuate in terreni di medio impasto - argillosi ben preparati, per sfruttare l'umidità del terreno e capitalizzare le piogge della tarda primavera. Per l'operazione si usano generalmente seminatrici di precisione pneumatiche, regolate per deporre il seme a non più di 3 cm di profondità. La regolazione sulla fila deve

tenere conto di un'emergenza percentuale pari a circa 60-75% del seme deposto; la densità ottimale è inferiore ai tipi da granella e pari a 10-12 piante m⁻² con interfila di 70-75 cm o di 45-50, a seconda del tipo di meccanizzazione in uso.

La temperatura ottimale di crescita è 26-28 °C. Il minimo di germinazione è attorno a 10 °C, quella di vegetazione a 13 °C.

Per quanto riguarda la concimazione, non si può prescindere dalla dotazione di elementi nutritivi del terreno, in relazione anche alle colture e alle pratiche di fertilizzazione effettuate nel recente passato. Ciò premesso, il sorgo è un cereale e come tale ha forti esigenze di azoto, cui riesce a sopperire in parte attingendo dalle riserve del terreno. La concimazione può essere pertanto ridotta rispetto al mais; in condizioni di fertilità medie, 100-150 kg ha⁻¹ di azoto da concimi minerali, suddivisi tra presemina e copertura o unicamente in copertura (ambienti umidi), sono sufficienti ad assicurare una vegetazione equilibrata e buone produzioni finali. Per il fosforo, 50-100 kg ha⁻¹ di P₂O₅ bastano a coprire le esigenze colturali nella maggior parte dei casi. Infine il potassio, pur essendo l'elemento assorbito in maggior quantità, può non essere distribuito nei terreni ricchi dell'elemento, in genere quelli di medio impasto e argillosi. Le asportazioni medie sono 10,4 (N), 2,5 (P₂O₅), 12,4 (K₂O), 10,1 (CaO) e 3,1 (MgO) kg per tonnellata di sostanza secca prodotta.

Il sostegno idrico può già essere necessario in fase di emergenza, nel caso di letto di semina troppo asciutto e carenza di piogge. Superata la fase di affrancamento, l'irrigazione può risultare economica unicamente nei casi di forte deficit idrico. A seconda degli ambienti, gli interventi potranno essere di soccorso (ambienti sub-umidi) o sistematici (ambienti più siccitosi). La prevalenza nell'impiego dell'acqua va data alla fase di levata, contraddistinta da elevati consumi specifici (coefficienti colturali K_C della FAO).

Un valido sistema per la raccolta della biomassa prevede il taglio con falcia-condizionatrice, seguito da essiccamento in andane fino ad un contenuto di umidità del 20-25%. A questo punto è possibile imballare e stoccare il prodotto. Questa

modalità è consigliabile, nel centro-nord Italia, non oltre la prima decade di settembre, con sorgo in maturazione latteo-cerosa. Ritardare oltre tale epoca aumenta il rischio di piogge che causano allettamento e ostacolano la raccolta del prodotto da terra. Altri sistemi prevedono: sfalcio, trinciatura, essiccazione del prodotto a terra e successiva raccolta con imballatrice; trinciatura, caricamento diretto del prodotto e successivo insilamento.

In terreni fertili del nord Italia, gli ibridi odierni raggiungono produzioni parcellari da 20 a 30 t ha⁻¹ di s.s. in asciutto mentre la produzione media si attesta intorno alle 100 t ha⁻¹ di materiale fresco con il 10-12% di saccarosio in media e con un rendimento potenziale del 60% di alcool per fermentazione (Baldoni, 2000).



Figura 12: Raccolta meccanica del sorgo da fibra

MAIS

Zea mays L.



Figura 13. *Zea mays* L.

Classificazione, morfologia e caratteristiche botaniche

La specie *Zea mays* appartiene alla famiglia delle *Poaceae* e comprende tutti i mais attualmente coltivati. Si divide in diverse sottospecie, le principali delle quali sono *Z. mays indentata* (mais dentato) e *Z. mays indurata* (mais vitreo); il primo, in particolare, è l'ideotipo dei principali mais da granella e da foraggio/biomassa attualmente coltivati. Specie annuale C_4 , adatta ad ambienti caldi ma sufficientemente umidi. L'apparato radicale è di tipo fascicolato, espanso e non molto profondo e dispone di radici primarie (seminali), attive nelle fasi giovanili; secondarie (avventizie, dalla corona ipogea), che accompagnano la coltura per tutta la durata del ciclo; aeree (dai primi nodi), che possono contribuire all'ancoraggio della coltura. La pianta è eretta, monocaule o poco accestita, di altezza generalmente non superiore ai 3-4 metri. È una specie monoica diclina, cioè con infiorescenze separate ma riunite nella stessa pianta: quella maschile (detta

pennacchio) è una pannocchia alla sommità del fusto; quella femminile (detta pannocchia) è una spiga con asse carnosio (spadice) posta all'ascella di una foglia a media altezza. Le foglie sono inserite ai nodi in posizione alterna sui due lati del fusto, in numero variabile da 10 (mais precoci) a più di 20 (tardivi), con lamina da 50 ad oltre 100 cm di lunghezza. L'impollinazione è anemofila e prevalentemente allogama, con una tendenza alla proterandria più accentuata quando la pianta è in stress. Tra la fecondazione e la maturazione fisiologica del seme passano normalmente 40-60 giorni.

Caratteristiche genetiche e genotipi

Al momento gli ibridi a due vie (single cross) restano gli unici materiali genetici in uso in paesi a maiscoltura avanzata come il nostro. La scelta tra i vari ibridi si fa innanzi tutto in base alla lunghezza del ciclo: vi sono diverse classi convenzionali di maturità in base alla classificazione FAO (FAO 100 - 800); in Italia gli ibridi da piena stagione più usati rientrano nelle classi FAO 500 - 700, corrispondenti a un ciclo nominale di 125 - 135 giorni; effettivo (semina - maturazione di raccolta) tra 150 e 180; ibridi più precoci (es. FAO 300) possono essere utilizzati per semine a tarda primavera, in successione a coltura raccolta precocemente (erbai autunno-primaverili, orticole, ecc.), anche se la produzione di granella e di biomassa risente inevitabilmente dell'accorciamento del ciclo, e la semina tardiva comporta un ricorso all'irrigazione superiore alla semina in epoca classica. Eccetto rari casi, il mercato non offre ancora genotipi specificamente selezionati per destinazione energetica, ma ibridi ad uso zootecnico (granella, foraggio) convertiti al mercato energetico. Per la produzione di energia, è importante una certa rusticità dell'ibrido, soprattutto nei confronti di malattie e fitofagi. A seconda della porzione di pianta interessata alla trasformazione energetica (sola granella o biomassa intera), bisognerà prestare attenzione anche al rapporto granella/pianta intera (harvest index), che dovrà essere più alto nel primo che nel secondo caso. Nel caso di utilizzazione integrale della biomassa per energia, anche la qualità della fibra

(digeribilità) riveste una crescente importanza, come testimonia l'impegno profuso in questa direzione dai costitutori. Appare pertanto verosimile che in futuro gli attuali ibridi per lo più a duplice destinazione (granella/foraggio) si differenzino in tipi più marcatamente adatti all'una o all'altra utilizzazione, con differenze morfologiche anche sensibili. Le produzioni energetiche rientrano implicitamente nell'una o nell'altra tipologia, a seconda della porzione di pianta interessata. Pur tuttavia, non si esclude che nei prossimi anni, in vista di un'espansione del settore, possano rendersi disponibili materiali genetici con caratteristiche anche diverse da quelli attuali e, come tali, adatti a una diversa tecnica colturale.

Tecniche colturali e potenzialità produttive

Il seme è grande (attorno a 250 mg) e vigoroso ma è ugualmente opportuno curare la preparazione del letto di semina, onde evitare fallanze e irregolarità. Viceversa, una lavorazione profonda è spesso superflua ed economicamente non conveniente. Ci si potrà quindi orientare verso un'aratura a media profondità come nel sorgo (25-30 cm), da preferire quando occorre interrare residui di colture precedenti o fertilizzanti organici. In alternativa, possono risultare più convenienti lavorazioni superficiali (10-25 cm) senza inversione della zolla, operando con organi passivi (dischi, denti), come nel sorgo. La non lavorazione (sod-seeding) non è sempre indicata per il mais, stante il basso investimento unitario e l'esigenza di una buona regolarità di investimento, come premessa per buone produzioni. L'affinamento del letto di semina può essere effettuato con diversi strumenti, tenendo presente che la semina in epoca più precoce ed a maggiore profondità del mais rispetto al sorgo riduce il rischio di essiccamento del letto di semina.

La semina dovrebbe aver luogo con temperature del terreno attorno a 10 °C, orientativamente nella prima metà di aprile al nord. Nel recente passato lo sforzo dei costitutori ha permesso di ottenere sementi in grado di germinare a temperature tendenzialmente inferiori, ovvero di resistere a ritorni di freddo senza particolari danni. Pertanto le semine hanno guadagnato una quindicina di giorni di anticipo,

iniziando in Pianura padana attorno alla metà di marzo. Per l'operazione si usano quasi esclusivamente seminatrici di precisione pneumatiche, che depongono il seme a profondità variabili fra 3 e 8 cm, in funzione dell'epoca e dell'umidità del terreno. Operando con scrupolo, non è difficile ottenere un'emergenza dell'ordine dell'80% del seme deposto. L'investimento ottimale varia tra 5,5 e 8 piante m^{-2} ; investimenti alti devono essere riservati a ibridi precoci, o destinati alla raccolta integrale della biomassa, o caratterizzati dall'architettura "a foglia eretta", o infine coltivati in ambienti fertili, soprattutto dal punto di vista idrico. Investimenti bassi devono essere invece impiegati nelle condizioni opposte. La distanza interfilare è di 70-75 cm o di 45-50, a seconda del tipo di meccanizzazione in uso: più frequente la prima nelle zone dove si coltiva mais da foraggio, entrambe egualmente diffuse in zone dove prevale il mais da granella.

La concimazione deve tenere conto della disponibilità di elementi nutritivi e della fertilità generale dell'ambiente di coltivazione. Il mais è un cereale molto esigente, caratterizzato da una fase di consumi di punta molto elevati (levata - fioritura), nel corso della quale un deficit nutrizionale si ripercuote inevitabilmente sulla produzione. L'azoto è l'elemento maggiormente richiesto dalla coltura, rispetto alle disponibilità naturali. In condizioni di fertilità medie, occorrono 150 - 250 kg ha^{-1} di azoto tra presemina e copertura per massimizzare la produzione. L'inserimento della coltura in zone vulnerabili ai fini della tutela delle acque dai nitrati di origine agricola (max. 170 kg di N ha^{-1}), può pertanto comportare qualche vincolo di natura produttiva, fatti salvi gli orientamenti delle diverse regioni nella gestione dei concimi minerali rispetto ai fertilizzanti organici e ai reflui zootecnici.

Fosforo e potassio si possono più facilmente gestire tenendo conto della dotazione del terreno e della destinazione produttiva: se solo la granella viene rimossa dai campi, una consistente quota di questi due elementi viene restituita al terreno con l'abbondante biomassa residua.

Sovente è necessario irrigare a supporto della produzione, per non vanificare gli investimenti fatti in altre voci di spesa (semente, lavorazioni, diserbo,

concimazione). Per non appesantire troppo il conto colturale, il mais viene opportunamente coltivato in zone pedo-climaticamente vocate, soprattutto dal punto di vista della freschezza ambientale e della disponibilità idrica. In tali zone, è normalmente necessario irrigare durante le fasi riproduttive, con un numero di interventi (1 - 3) e con volumi stagionali (50 - 150 mm) variabili a seconda delle esigenze stagionali e dei costi sostenibili a livello aziendale.

I sistemi di raccolta del mais devono tenere conto della finalità produttiva: se le due porzioni della pianta, granella e residui, hanno diversa destinazione produttiva, occorre attendere la maturazione di raccolta della pianta, con umidità della granella sul 20 - 25%, e stocco, foglie e brattee ormai secchi. Si interviene con una mietitrebbia con testata da mais, avviando tempestivamente la granella all'essiccazione, mentre i residui possono essere raccolti e imballati da terra in un secondo momento. Se, viceversa, interessa la raccolta integrale della biomassa complessiva, si anticipa la raccolta alla fase di maturazione cerosa della granella, operando con una falcia-trincia-caricatrice che produce un trinciato con umidità attorno al 65%, conservabile a lungo tramite insilamento.



Figura 14: Raccolta meccanizzata del mais, fase di scarico

Considerando un harvest index di 0,45, tipico di una coltura che non abbia subito forti stress, le produzioni di pieno campo sono dell'ordine di 10 t ha^{-1} di granella a

umidità di riferimento (14%), e circa altrettanto di residui imballabili, principalmente costituiti dai fusti (stocchi). In termini di biomassa fresca, questi dati corrispondono a 60 t ha⁻¹ di prodotto allo stadio ceroso. Nelle zone più vocate, non mancano aziende che raggiungono le 12 - 14 t ha⁻¹ di granella o quantitativi corrispondenti di ceroso, ottenuti molto spesso con un livello di input produttivi (es. acqua irrigua) difficilmente compatibile con la destinazione energetica della coltura.

FRUMENTO

Triticum spp. L.



Figura 15. Triticum Spp. - Frumento

Classificazione, morfologia e caratteristiche botaniche

Il genere *Triticum* appartiene alla famiglia delle *Poaceae* e comprende diverse specie, fra queste assumono particolare importanza per la coltivazione soprattutto il *T. durum* ed il *T. aestivum*, rispettivamente grano duro e grano tenero, coltivate per scopi alimentari, ma che possono assumere un ruolo interessante per la produzione di carboidrati fermentescibili per la produzione di etanolo.

La cariosside, di forma ovoidale, possiede una buona quantità di endosperma costituito principalmente da amidi. L'apparato radicale è di tipo fascicolato, espanso e non molto profondo e dispone di radici primarie (seminali), attive nelle fasi giovanili; secondarie (avventizie, dalla corona ipogea), che accompagnano la

coltura per tutta la durata del ciclo. La pianta è eretta, monocaule o poco accestita (in media 0,5-1 culmo di accestimento per pianta) , di altezza generalmente non superiore al metro, e comunque variabile in funzione della specie e della cultivar, nelle varietà di ultima generazione difficilmente si superano gli 80 cm di altezza. Le foglie sono inserite ai nodi in posizione alterna sui due lati del fusto, e sono parzialmente guainanti. L'infiorescenza è una pannocchia spiciforme, formata da un rachide che porta ad ogni dente una spighetta formata da due glume, a sua volta ogni spighetta è costituita da più fiori, solo alcuni di essi sono fertili.

Caratteristiche genetiche e genotipi

Ad oggi i frumenti coltivati si distinguono in due gruppi:

- frumenti teneri, che presentano culmi vuoti e spighe mutiche, o più raramente aristate; l'endosperma della granella ha struttura farinosa e fornisce farine adatte alla panificazione;
- frumenti duri, che si caratterizzano per culmi parzialmente pieni, spighe compatte fortemente aristate e cariossidi a frattura vitrea, ricche di glutine, adatte alla produzione di paste alimentari.

Gli obiettivi del miglioramento genetico negli ultimi anni hanno interessato sia caratteri morfologici che fisiologici, sul primo fronte si è agito soprattutto sulla riduzione dell'altezza e l'irrobustimento dei culmi, per ridurre al massimo l'allettamento anche in caso di semine con investimenti elevati; sul piano fisiologico il lavoro dei genetisti è stato più incentrato sulla resistenza alle malattie e sul miglioramento delle caratteristiche della granella (peso ettolitrico, quantità e tipologia di proteine, caratteristiche molitorie ecc.).

Nell'ottica di un utilizzo a fini energetici, è possibile che alcune cultivar, più produttive ma qualitativamente inferiori, abbandonate in passato perché scarsamente interessanti dal punto di vista alimentare possano trovare nuova collocazione nei sistemi colturali.

La buona conoscenza della coltura da parte del mondo agricolo da un lato, e la

minor esigenza di input dall'altro, possono rendere il frumento competitivo rispetto al mais per la produzione di etanolo di prima generazione, già nel breve-medio periodo

Tecniche colturali e potenzialità produttive

La tecnica convenzionale per il frumento prevede una lavorazione medio-superficiale (circa 20 cm) seguita da operazioni di affinamento del terreno, si evidenziano risultati soddisfacenti anche con la minima lavorazione. La semina, effettuata a 3-5 cm di profondità con seminatrice convenzionale, deve prevedere un investimento di circa 400 semi germinabili al metro quadro, che corrispondono ad un quantitativo di seme variabile da 160 a 220 kg/ha a seconda della varietà. L'epoca di semina varia da metà ottobre a fine novembre a seconda dell'andamento stagionale e della latitudine.

La concimazione deve tenere conto della disponibilità di elementi nutritivi e della fertilità generale dell'ambiente di coltivazione. L'azoto è l'elemento maggiormente richiesto dalla coltura, rispetto alle disponibilità naturali. In condizioni di fertilità medie, occorrono 150 - 180 kg ha⁻¹ di azoto tra presemina e copertura per massimizzare la produzione. Fosforo e potassio si possono più facilmente gestire tenendo conto della dotazione del terreno e della destinazione produttiva, in generale le asportazioni di tali elementi corrispondono rispettivamente all'1%(P₂O₅) e al 2 % (K₂O) in peso rispetto alla resa.

Per la raccolta si interviene con una mietitrebbia con testata classica, quando l'umidità della granella scende sotto al 14%, mentre i residui possono essere raccolti e imballati da terra in un secondo momento.

Nelle zone più vocate, la produzione può raggiungere le 10 t ha⁻¹ di granella, in media tuttavia le produzioni si attestano sulle 6 t, la produzione di paglia è variabile in funzione della cultivar, mediamente si attesta sulle 4-5 t/ha.

GIRASOLE

Helianthus annuus L.



Figura 16: Helianthus annuus L.

Classificazione, morfologia e caratteristiche botaniche

Appartiene alla famiglia delle *Compositae* ed è la più importante specie del genere *Helianthus*.

Il fusto è eretto, vigoroso, cilindrico, internamente pieno di midollo. La sua lunghezza nelle specie da olio varia tra i 60 ed i 220 cm. Il diametro del fusto varia tra i 2 ed i 5 cm ed è ineguale tra i diversi tratti. A maturità tende a piegarsi al di sotto della calatide con un'inclinazione caratterizzata da notevole variabilità.

Le foglie sono alterne, grandi, trinervate, con margine dentato, la loro forma cambia secondo la loro posizione rispetto al fusto ed il loro numero può variare da 12 a 40, secondo le condizioni di coltivazione e le caratteristiche vegetali. Una pianta pienamente sviluppata può raggiungere una superficie fogliare compresa tra 3000 e 6000 cm², secondo le condizioni di fertilità del suolo.

L'infiorescenza (calatide) è formata da numerosi fiori collocati sul ricettacolo discoidale. Il suo diametro varia moltissimo (tra i 10 e i 40 cm) a seconda delle

varietà e delle condizioni di coltura. La calatide fin dall'inizio della fioritura effettua movimenti di rotazione per i quali la superficie discoidale forma costantemente un angolo retto con la direzione dei raggi del sole. Sul ricettacolo si trovano i fiori ligulati e quelli tubolosi. I fiori ligulati sono disposti radialmente in 1-2 file con 30-70 fiori asessuati, raramente unisessuati femminili. Il colore è giallo-dorato, giallo paglierino o giallo arancione. I fiori tubolati sono ermafroditi e sono disposti in archi spiraliformi che irradiano dal centro del disco.

Il frutto è un achenio compresso, largo 3,5-9 mm, lungo 7,5-17 mm, con spessore di 2,5-5 mm. Ha un pericarpo duro e fibroso, finemente vellutato. Il colore varia dal bianco al nero, a volte con nervature bianche o grigie.

Il sistema radicale considerato di tipo esplorativo, evidenzia una grande capacità di utilizzare le risorse idriche e le sostanze nutritive esistenti nel terreno anche in ridotta quantità. Nelle prime fasi la radice principale fittonante si accresce più rapidamente rispetto alla parte aerea e raggiunge il suo massimo sviluppo all'inizio della fioritura. Dal fittone si dipartono numerose ramificazioni che all'inizio si sviluppano orizzontalmente in superficie e successivamente tendono a spingersi in profondità formando un abbondante capillizio. L'apparato radicale può superare la profondità di 2 m.

Caratteristiche genetiche e genotipi

Il registro nazionale delle varietà elenca al più di 200 ibridi in gran parte di provenienza straniera. Gli ibridi più interessanti per la destinazione energetica risultano essere quelli in cui si è cercato di incrementare due principali fattori: la produzione areica di olio, ovvero il contenuto di olio per seme, e l'incremento qualitativo dell'olio prodotto.

Tecniche colturali e potenzialità produttive

Per una coltura a ciclo primaverile-estivo qual è il girasole, le lavorazioni tendono principalmente ad aumentare la capacità idrica del terreno. La tendenza attuale è

quella di effettuare arature a media profondità (25-30 cm), in quanto riescono a fornire risultati analoghi o addirittura superiori rispetto alle arature profonde (circa 50 cm), a causa di una migliore emergenza delle plantule ed una minore difficoltà di insediamento della coltura. All'aratura seguono tutte quelle lavorazioni secondarie che si rendono utili per l'affinamento del terreno e per la preparazione di un buon letto di semina.

Il seme di girasole è in grado di iniziare la germinazione con una temperatura del terreno di 6-8 °C. La semina viene effettuata con seminatrici pneumatiche di precisione con dischi da girasole. La densità di semina da adottare deve tenere conto delle condizioni del suolo alla semina, che condizionano la germinabilità e la disponibilità idrica prevista durante il ciclo: si consiglia un investimento di 7-9 semi/m² al fine di ottenere un investimento alla raccolta di 6-7 piante/m².

Nell'ambito delle esigenze trofiche del girasole è unanime il riconoscimento del ruolo preponderante svolto dall'azoto. Nelle condizioni ambientali italiane, tenuto conto della scarsa disponibilità di azoto mediamente rilevata nei nostri terreni, si ritiene forse opportuno consigliare dosi di 80-100 kg ha⁻¹ per gli investimenti tradizionalmente adottati di 5-6 piante/m². La quantità totale di fosforo asportato dalla coltura (circa 1,5-2,3 kg di P₂O₅ per 100 kg di granella) non sembra sollevare particolari problemi purché l'apparato radicale del girasole abbia un adeguato approfondimento nel suolo. L'asportazione effettiva da parte della coltura si limita ad una quota di circa il 40-50% del totale assorbito ed è opportuno che le somministrazioni di questo elemento vengano soprattutto definite tenendo conto delle effettive dotazioni del terreno. Il girasole assorbe senz'altro anche un alto quantitativo di potassio (4-4,5g per pianta), quasi tutto prime della fioritura, ma in questo caso la maggior parte dell'elemento assorbito non viene effettivamente asportato in quanto solo il 20-25% si ritrova negli acheni. Tra i microelementi è importante ricordare il boro, di cui la pianta è molto esigente.

Le attuali varietà di girasole, in regime di massima disponibilità idrica evidenziano un fabbisogno di acqua per l'intero ciclo di circa 600 mm e consumi giornalieri

fino a 6 mm, con punte massime anche di 10 mm/giorno. Una distribuzione di acqua equilibrata nelle varie fasi fenologiche può consentire anche rese molto elevate (3,5-4 t ha⁻¹). D'altro canto è noto che il girasole è in grado di fornire una certa produzione anche in condizioni di limitata disponibilità idrica. In questi ambienti si può prevedere, in caso di eccezionale stress, un'irrigazione di soccorso, solo nelle fasi più critiche per la formazione della produzione, che coincidono con il periodo della comparsa del bottone fiorale ed il riempimento degli acheni.

La coltura è da considerarsi pronta per la raccolta 15-20 giorni dopo che le piante hanno raggiunto la maturazione fisiologica. L'umidità degli acheni alla raccolta deve essere del 9-10%. Il girasole si raccoglie con la mietitrebbiatrice da grano dotata di un'apposita testata specifica per il girasole che riduce le perdite durante la mietitura.



Figura 17. Raccolta meccanica del girasole

La produzione media si aggira attorno alle 3 t ha⁻¹ che permette di estrarre circa 1,5 t ha⁻¹ di olio.

COLZA

Brassica Napus L.



Figura 18. Brassica napus L.

Classificazione, morfologia e caratteristiche botaniche

Il colza è una crucifera appartenente alla famiglia delle *brassicacee*, che comprende diverse specie, oltre a colza anche alcune altre specie del genere *brassica* (e.g. *B. juncea* e *B. carinata*) suscitano oggi interesse per la produzione di biodiesel.

L'apparato radicale è di tipo fittonante scarsamente ramificato, il fusto è eretto e può raggiungere i 150 cm di altezza anche se ad oggi sono disponibili varietà “dwarf” di altezza inferiore al metro. Le foglie sono di colore verde chiaro, leggermente carnose e presenta un'infiorescenza a grappolo di colore giallo vivo. Il frutto è una siliqua deiscente che porta i semi, di forma sferica, in numero variabile da 20 a 40.

Caratteristiche genetiche e genotipi

Le cultivar da olio oggi disponibili sono principalmente di origine tedesca o francese e a semina autunnale, il miglioramento genetico ha puntato principalmente sulla tolleranza ad alcuni patogeni e all'allettamento, oltre che alla distinzione di due gruppi varietali discriminati dall'alto o basso contenuto di acido erucico nella composizione acidica degli oli (per l'uso alimentare si prediligono le varietà a basso contenuto di acido erucico). In Italia, ad eccezione di pochi areali, le rese di colza sono inferiori rispetto alle zone centro europee, soprattutto per via della scarsa selezione genetica ad hoc per le esigenze pedoclimatiche italiane.

Tecniche colturali e potenzialità produttive

La lavorazione principale prevede un'aratura a media profondità (25-30 cm) cui seguono le lavorazioni secondarie che si rendono utili per l'affinamento del terreno e per la preparazione di un buon letto di semina; la coltura si adatta bene a diversi tipi di terreno anche se predilige i suoli freschi, argillosi e profondi.

La semina viene effettuata con seminatrici pneumatiche di precisione, La densità di semina da adottare deve tenere conto delle condizioni del suolo alla semina, effettuata in periodo autunnale, l'investimento consigliato è di circa 6-10 kg di seme per ettaro a seconda della cultivar con semine a file semplici distanti circa 40 cm.

Per quanto riguarda la fertilizzazione, il colza asporta 2,4-2,7 kg di P_2O_5 e K_2O , e 3-3,2 kg di N ogni 100 kg di granella prodotta. Normalmente concimazioni con 60-80 unità di anidride fosforica e 100-110 unità di azoto sono sufficienti per la coltura negli areali nord italiani.

La raccolta, mediante metitrebbiatura, si esegue quando la granella ha ancora un leggero eccesso di umidità, poiché l'attesa di ulteriore essiccamento sulla pianta provocherebbe la deiscenza delle silique e quindi la perdita di prodotto, in seguito la granella va essiccata fino a quando il contenuto di umidità non scende sotto al

10%. hanno raggiunto la maturazione fisiologica.

LCA in agricoltura, stato dell'arte

L'impatto ambientale dei sistemi agricoli è spesso dibattuto, tuttavia sono molto pochi gli studi che prendono in considerazione il problema da un punto di vista multi-criteriale, spesso infatti gli studi sull'effetto ambientale sono limitati alla lisciviazione azotata, all'erosione, o comunque correlati al livello di input agronomici utilizzati nei processi di coltivazione.

La Life Cycle Assessment (LCA) è una metodologia che permette di identificare tutti gli impatti ambientali associate a un prodotto, ad un processo o ad un'attività, identificando e quantificando tutte le risorse consumate e le emissioni rilasciate nell'ambiente.

Oggi l'LCA è prevalentemente impiegata nello studio di processi industriali, tuttavia risulta crescente l'interesse dell'applicazione di questa metodologie anche su processi agricoli, nei quali però, le variabili climatiche, pedologiche e biologiche pongono alcuni limiti di precisione e di validità dei risultati ottenuti.

Tuttavia, la metodologia LCA risulta efficace, con appositi accorgimenti, anche nel valutare il carico ambientale derivante dalla pratica agricola. I sistemi agricoli contribuiscono ad un ampia gamma di tipologie di impatto ambientale (es. cambiamento climatico, acidificazione, eutrofizzazione etc.), ma l'analisi dei singoli effetti, come ad esempio le perdite di azoto, non consente di trarre una conclusione da un punto di vista globale e non determina, nel caso di comparazione tra due sistemi di produzione differenti, quale di essi sia il meno

impattante. Risulta quindi necessario approfondire in maniera sito-specifica alcuni aspetti, per ottenere un risultato attendibile, ad esempio, per la lisciviazione azotata, non può essere preso un valore di riferimento, ma lo studio deve essere approfondito con un apposito modello, che tenga conto del tipo di terreno, della piovosità dell'areale considerato, della distribuzione delle piogge in relazione all'epoca di concimazione etc.

La LCA è stata creata per studiare tutti gli impatti ambientali connessi ad un intero processo produttivo (Consoli et al., 1993), quindi utilizzando questa metodologia non si determinano esclusivamente gli impatti derivanti dalla produzione delle colture solo sul campo, ma anche tutti gli impatti connessi alla realizzazione dei fattori di produzione, come ad esempio le emissioni e il consumo di risorse dovuta alla produzione di fertilizzanti.

È ovvio che la fase agricola, nella concezione aziendale tipica dei paesi industrializzati, non è quasi mai fine a se stessa, l'intero ciclo di vita del prodotto agricolo infatti, passa quasi sempre per una fase agro-industriale, o di commercializzazione. Lo studio LCA del processo di coltivazione quindi, deve essere integrabile con i risultati di studi analoghi del resto della filiera, pertanto le metodologie applicate e gli indicatori ambientali considerati devono essere il più possibile omogenei.

Esistono alcuni effetti ambientali, tipicamente territoriali o biologici, fortemente influenzati dai processi agricoli (e.g. erosione, immagazzinamento del carbonio e di altri elementi), che sono inesistenti nelle successive fasi di produzione, ma che

hanno una ricaduta importante sull'impatto locale e globale dei processi di coltivazione.

Materiali e metodi

La *Life Cycle Assessment* (LCA), conosciuta in Italia come analisi del ciclo di vita dei processi produttivi, può essere considerata come l'evoluzione della tecnica di analisi energetica, i cui primi esempi di applicazione risalgono alla fine degli anni sessanta, quando alcune grandi industrie hanno incominciato a rivolgere un interesse particolare ai temi del risparmio delle risorse (energia e materiali) e del contenimento delle emissioni nell'ambiente.

Dal crescente interesse verso questi temi deriva l'attualità del LCA, la cui caratteristica fondamentale è costituita dal modo assolutamente nuovo di affrontare l'analisi dei sistemi produttivi: dall'approccio tipico dell'ingegneria tradizionale, che privilegiava lo studio separato dei singoli processi produttivi, si passa ad una visione globale del sistema produttivo, in cui tutti i processi di trasformazione, a partire dall'estrazione delle materie prime fino allo smaltimento dei prodotti a fine vita, sono presi in considerazione in quanto partecipano alla realizzazione della funzione per la quale essi sono progettati.

Fasi di una LCA

L'elaborazione di una LCA si articola essenzialmente in 4 fasi:

- *definizione degli scopi e degli obiettivi* (goal and scope definition)

è la fase preliminare in cui vengono definiti le finalità dello studio, i criteri di acquisizione dei dati, l'unità funzionale, i confini del sistema studiato, il fabbisogno di dati, le assunzioni ed i limiti;

- *inventario* (life cycle inventory, LCI)

è la prima fase operativa, dedicata allo studio del ciclo di vita del processo o attività; lo scopo principale è quello di ricostruire il flusso dell'energia e dei materiali che permettono il funzionamento del sistema produttivo in esame e dei relativi sottoprocessi;

- *analisi degli impatti LCIA (life cycle impact assessment)*

è lo studio dell'impatto ambientale provocato dal processo o dall'attività, ed ha lo scopo di evidenziare l'entità delle alterazioni ambientali generate a seguito dei consumi di risorse e delle emissioni calcolati nell'inventario;

- *interpretazione e miglioramento (life cycle engineering)*

è la parte conclusiva di una LCA, facoltativa nella procedura delineata dalle normative ISO, che ha lo scopo di evidenziare i cambiamenti necessari a ridurre l'impatto ambientale dei processi o attività considerati, proponendo alternative, valutandole in maniera iterativa con la stessa metodologia.

Questi diversi momenti di analisi costituiranno il punto di riferimento per gli interventi su un processo di produzione esistente o per il progetto di un nuovo prodotto.

Definizione degli scopi e degli obiettivi (goal and scope definition)

Una LCA deve essere necessariamente preceduta da un'esplicita dichiarazione degli obiettivi e delle finalità dello studio. Questa dichiarazione è estremamente importante in quanto consente di definire i confini della ricerca e quindi quelli del sistema oggetto dello studio, nonché per esprimere i risultati in maniera opportuna. Dalle finalità e dalle eventuali esigenze dell'utilizzatore dell'analisi discendono alcune caratteristiche fondamentali dello studio: i confini del sistema preso in esame, i possibili scenari alternativi, la qualità dei dati e la scelta dei parametri, l'estensione della fase di valutazione e di miglioramento, il livello di dettaglio a cui arrivare.

Una prima delimitazione dei confini viene effettuata con criteri sia geografici che tecnologici, comprendendo cioè nell'ambito della ricerca gli ambienti fisici e i processi produttivi che si ritiene di dover considerare per l'analisi. Successivamente sarà possibile escludere i componenti che si dimostreranno non rilevanti oppure includerne altri ai quali inizialmente non si era attribuita un'adeguata importanza. Se l'analisi del ciclo comprende tutte le fasi del processo

produttivo, ovvero “dalla culla alla tomba”, il risultato complessivo dell'analisi si può definire “ecoprofilo”. Anche il periodo di riferimento (temporal boundaries) costituisce un vincolo nella scelta dei confini dell'analisi: i dati devono essere raccolti in un periodo di tempo ben definito. I dati possono essere acquisiti in diversi modi: misurazioni dirette, stime indirette, dati bibliografici, etc.

Prima di procedere alla raccolta dei dati è necessario definire in maniera appropriata il sistema che si intende analizzare. E' importante definire un'unità di misura di riferimento, chiamata “unità funzionale”, a cui riferire i dati e le informazioni di una LCA. La scelta di tale unità è un elemento delicato del sistema, da operare in funzione dell'obiettivo dello studio; per i processi agricoli, ad esempio, è possibile scegliere come unità funzionale l'unità di peso del prodotto considerato (es. g, kg, t, etc.), l'unità di superficie coltivata (ha), il valore economico della PLV, etc. La sua definizione risulta quindi fondamentale per la comprensione delle informazioni che lo studio è in grado di fornire e per rendere possibile e agevole un confronto tra diversi processi che assolvono la stessa funzione.

Inventario (life cycle inventory, LCI)

Ogni gruppo di operazioni industriali può essere trattato come un sistema comunicante con l'ambiente attraverso input ed output e, in particolare, può essere modellizzato con una sequenza complessa di operazioni unitarie. La redazione di un inventario è quindi un'operazione di raccolta e di organizzazione in un modello dei dati riguardanti gli scambi tra le singole operazioni appartenenti alla catena produttiva (e/o distruttiva) effettiva e tra il sistema complessivo della produzione agro-energetica e il sistema ambiente. Non sono compresi, a questo livello di analisi, valutazioni o giudizi circa il significato dei diversi input e output, ossia circa gli effetti ambientali che questi possono provocare: obbiettivo di un LCI è, infatti, quello di fornire dati oggettivi, che solo in seguito potranno essere oggetto di elaborazioni e di commenti da cui trarre valutazioni e indicazioni utili a livello

decisionale. Un inventario deve offrire garanzie di affidabilità, e per questo la sua redazione deve essere effettuata seguendo un codice ben definito. Solo in questo modo i risultati di diversi inventari sono tra loro confrontabili, essendo ottenuti i base ad un'unica modalità di modellizzazione.

Analisi degli impatti (life cycle impact assessment LCIA)

Le informazioni ottenute dall'inventario costituiscono la base di partenza per le valutazioni di tipo ambientale, cui è dedicata la fase della LCA definita di Analisi degli Impatti. L'analisi ha lo scopo di evidenziare l'entità delle modificazioni ambientali che si generano a seguito delle emissioni nell'ambiente e del consumo di risorse provocati dall'attività produttiva. E' necessario precisare il significato che in questa sede va attribuito al termine “impatto”, per interpretarne correttamente i rapporti con gli effetti ambientali. Nel contesto di una LCA, un impatto è il risultato fisico immediato di una data operazione, consistente in particolare nell'emissione di certe sostanze, che è associato con uno o più effetti ambientali: ad esempio, il quantitativo di CO₂ emesso durante la combustione di carbone è una componente dell'impatto dell'operazione di combustione associato al “riscaldamento globale”. Comunque non è possibile correlare inequivocabilmente uno specifico impatto con i suoi effetti ambientali, e ci si deve pertanto limitare ad affermare che “l'impatto è ciò che prelude ad un effetto”, senza pretendere di poter quantificare rigorosamente il secondo sulla base del primo. Quindi mentre possiamo ottenere il valore numerico degli impatti dai risultati dalla fase di inventario, i corrispondenti effetti ambientali potranno essere solo essere stimati sulla base di ipotesi e convenzioni prestabilite.

Tutte le metodologie esistenti per la redazione di un LCIA fanno capo a due approcci fondamentali:

- metodo problem-oriented
- metodo damage-oriented

Nel metodo problem-oriented tutti i carichi ambientali determinati dai dati del LCI,

vengono associati ad una o più categorie di impatto sulla base dei meccanismi ambientali nei quali sono coinvolti. Questo metodo, detto anche “midpoint” si limita quindi a determinare e quantificare i carichi di ogni categoria di impatto (e.g. Il quantitativo di CO₂ emesso in atmosfera e non il potenziale aumento di temperatura che ne deriva). Il metodo damage-oriented punta, invece, ad aggregare le varie categorie di impatto in base agli effetti che esse hanno sulla salute umana, sull’ecosistema e sull’esaurimento delle risorse. Questi tre grandi gruppi sono definiti indicatori “endpoint” in quanto sono centrati sui danni che i risultati della fase LCI possono determinare in ambiti da tutelare.

Gli indicatori endpoint possono essere combinati secondo criteri predefiniti per dare un unico indicatore globale, in questa fase però entra una componente soggettiva di “pesatura” dei diversi indicatori (e.g. Se il processo produttivo in esame si ipotizza essere a ridosso di un centro abitato si assegnerà più peso all’impatto sulla salute umana).

L’analisi degli impatti ambientali ha come obiettivo fondamentale l’imputare i consumi e le emissioni ottenuti nella fase d’inventario a specifiche categorie di impatto riferibili ad effetti ambientali conosciuti, tentando di quantificare, con opportuni metodi di standardizzazione, l’entità del contributo complessivo che il processo o il prodotto arrecano al comparto ambientale potenzialmente danneggiato. In questo modo l’impatto risulta rappresentato da valori numerici ottenuti elaborando i risultati dello LCI con operazioni di raggruppamento e classificazione.

Per costituire le categorie d’impatto sono stati utilizzati i seguenti principali (endpoint):

- ecologia (*ecological effects*)
 - effetti sulla popolazione vegetale ed animale dell’ecosistema
- salute (*human health and safety effects*)
 - effetti su salute e sicurezza dell’uomo
- risorse (*resource depletion*)

esaurimento di risorse di energie e di materiali

Su questa base vengono scelti gli specifici effetti caratterizzanti le varie categorie di impatto (midpoint), che risultano di conseguenza definite come segue:

- C1 – Riscaldamento globale [*global warming*]
- C2 – Assottigliamento della fascia di ozono [*stratospheric ozone depletion*]
- C3 – Acidificazione [*acidification*]
- C4 – Eutrofizzazione [*nutrient enrichment*]
- C5 – Formazione di smog fotochimico [*photosmog formation*]
- C6 – Tossicità per l'uomo e per l'ambiente [*human and eco-toxicity*]

Per quanto riguarda le materie prime e l'energia intese come risorse, si adotta un criterio di classificazione di impatto basato sul concetto di non rinnovabilità della risorsa, per cui si deve aggiungere un'ulteriore categoria:

- C7 – Consumo di risorse non rinnovabili [*resource depletion*]

Operativamente la classificazione consiste nell'organizzare i dati dell'inventario, ovvero tutti i valori delle emissioni provocate direttamente e indirettamente dalle operazioni considerate, distribuendoli nelle varie categorie d'impatto. Il problema però non è semplice, poiché una stessa sostanza costituente un'emissione può contribuire a più fenomeni di impatto, provocando effetti a catena sovente di difficile interpretazione.

Gli effetti ambientali sono inoltre caratterizzati da una diversa sfera di influenza, che può essere globale, regionale oppure locale.

Midpoint

I dati dell'inventario vengono moltiplicati per fattori di standardizzazione (*characterization factor, CF*), che rappresentano il potenziale di ogni singola emissione o risorsa utilizzata che contribuisce all'incremento della specifica categoria d'impatto, per ottenere indicatori da inserire nella relativa categoria di impatto ambientale come si evince nell'equazione generale:

$$\text{indicatore}_i \text{ della categoria d' impatto} = \sum_j (E_j) \times CF_{i,j}$$

In cui:

- $indicatore_i$ della categoria d'impatto = valore dell'indicatore per unità funzionale della categoria di impatto i ;
- E_j = rilascio di emissioni j o consumo di risorsa j per unità funzionale;
- $CF_{i,j}$ = fattore di standardizzazione per l'emissione j o risorsa j che incide sulla categoria d'impatto i .

I fattori di caratterizzazione sono specifici per ogni categoria; ad esempio, per GWP, che esprime l'effetto serra di una sostanza, la CO_2 è pari a 1, mentre il metano è 21. Pertanto un grammo di metano emesso ha effetto equivalente a 21 grammi di CO_2 .

Riscaldamento globale

L'effetto serra è causato dalla presenza nell'atmosfera dei gas che assorbono la radiazione infrarossa emessa dalla terra; l'aumento della loro concentrazione provoca un incremento di temperatura del clima terrestre. In termini quantitativi lo studio del fenomeno si affronta prendendo in considerazione i singoli gas responsabili dell'effetto serra, studiandone le origini e valutandone le variazioni di concentrazione in atmosfera. Il gas serra di origine antropica che genera le maggiori preoccupazioni è l'anidride carbonica, che deriva principalmente dalla combustione dei combustibili fossili e dalla distruzione della foresta pluviale dei tropici. Altri gas che principalmente contribuiscono all'effetto serra sono il metano (CH_4), il protossido di azoto (N_2O). I quantitativi di gas serra oggetto dell'analisi vengono normalmente espressi in kg di CO_2 -equivalenti, attraverso un'operazione di standardizzazione basata sui potenziali di riscaldamento globale (GWPs, Global Warming Potentials). Questi potenziali sono calcolati per ciascun gas serra tenendo conto delle sue capacità di assorbimento delle radiazioni e del tempo della sua permanenza nell'atmosfera. Il GWP di una sostanza che abbia le caratteristiche di gas serra è in pratica misurato dal rapporto tra il contributo all'assorbimento della radiazione da parte di 1 Kg di tale sostanza e quello fornito da 1 Kg di CO_2 , essendo entrambi i contributi valutati per un periodo di tempo di T (anni) di

permanenza dei gas nell'atmosfera (Houghton *et al.*, 1991).

Detto GWP_i il potenziale di riscaldamento globale della sostanza i -esima e m_i la massa della sostanza stessa, il potenziale complessivo risultante sarà dato dalla relazione:

$$GWP = \sum GWP_i \times m_i$$

Assottigliamento della fascia di ozono stratosferico

La stratosfera, e cioè la zona compresa fra i 15 e i 50 Km al di sopra della superficie terrestre, è caratterizzata dalla presenza di ozono (O_3) che protegge la Terra dai raggi ultravioletti emessi dal sole. I cambiamenti che avvengono nella fascia stratosferica di ozono sono strettamente correlati ai problemi del riscaldamento globale. L'ozono si forma continuamente nella stratosfera in seguito all'assorbimento di radiazioni ultraviolette a bassa lunghezza d'onda e, contemporaneamente, è continuamente distrutto in seguito a reazioni chimiche che lo riconvertono in ossigeno molecolare. I principali responsabili della rottura delle molecole di ozono, e quindi della formazione del buco nel sottile strato protettivo, sono i CFC e gli HCFC, già citati come gas serra prodotti dall'uomo. Questi composti sono molto stabili, tanto che possono raggiungere inalterati la stratosfera: qui le loro molecole vengono rotte dai raggi ultravioletti, liberando così il cloro che attacca immediatamente le molecole di ozono. Un singolo atomo di cloro può rompere fino a diecimila molecole di ozono prima di tornare nella troposfera sotto forma di acido. La standardizzazione si basa sul potenziale di riduzione dell'ozono (ODP, Ozone Depletion Potential), e viene effettuata impiegando i fattori di conversione che trasformano i quantitativi di gas prodotti durante il processo in esame in kg di CFC-11 equivalenti. La relazione che lega l'ODP complessivo a quelli delle singole sostanze è del tutto simile a quella vista per il GWP.

$$ODP = \sum ODP_i \times m_i$$

dove ODP_i è il potenziale riferito alla sostanza i e m_i il quantitativo emesso dalla sostanza stessa, in kg.

Il potenziale di riduzione dell'ozono di una singola sostanza è quindi un parametro simile al GWP_i , e viene definito come il rapporto esistente tra il numero di reazioni di rottura della molecola di ozono in uno stato di equilibrio conseguente all'emissione in atmosfera di una data quantità di sostanza durante un anno di tempo (kg/anno) e il corrispondente numero di reazioni di rottura provocato, nelle stesse condizioni, da un'eguale quantità di CFC-11 (WMO, 1989).

Acidificazione

L'acidificazione delle piogge è principalmente causata da emissioni di anidride solforosa (SO_2), ossidi di azoto (NO_x) e ammoniaca (NH_3). L'anidride solforosa proviene principalmente dalla combustione di carbone e petrolio che contengono zolfo; gli ossidi di azoto provengono dai processi di combustione dei veicoli a motore, l'ammoniaca prevalentemente proviene dall'allevamento di animali (AEA, 1998). Anche nei processi agricoli si può avere un rilascio di queste sostanze in atmosfera. In particolare, l'impiego di composti organici e fertilizzanti minerali può portare a importanti emissioni di NH_3 a causa della volatilizzazione, durante e dopo l'applicazione, di urea e di fertilizzanti a base di ammonio (Brentrup *et al.*, 2000).

L'acidificazione ha effetti negativi sia sul suolo sia negli ecosistemi acquatici. Gli effetti delle emissioni potenzialmente acidificanti dipendono dal destino della deposizione (deposition pattern) e dalla vulnerabilità all'acidificazione dell'area dove avviene la deposizione (es, potere del tampone nel suolo). Per la quantificazione di questo impatto si impiegano fattori di standardizzazione che riportano ai kg di SO_2 -equivalenti attraverso il potenziale di acidificazione (AP) (Vermeire, 1992). L'operazione preliminare della standardizzazione consiste nell'aggregare le emissioni potenzialmente acide (SO_2 , NO_x , NH_x) in base alla loro tendenza a formare ioni H^+ . Il potenziale di acidificazione di una sostanza viene definito come il rapporto esistente tra il numero di ioni potenziali H^+ -equivalenti per unità di massa e quello della SO_2 , scelta come sostanza di riferimento.

Eutrofizzazione

La crescita degli organismi viventi è naturalmente limitata dall'apporto di sostanze nutrienti essenziali quali l'azoto e il fosforo. Un rilascio di tali sostanze nell'ambiente riduce questa limitazione con un conseguente abbassamento della concentrazione di ossigeno e quindi con effetti negativi sull'intero ecosistema. L'uso agricolo di fertilizzanti e gli scarichi industriali ed urbani sono le fonti principali dell'eutrofizzazione. La vegetazione terrestre (ovvero principalmente piante superiori) e le piante acquatiche (ovvero principalmente le alghe) rispondono in modo diverso ad ulteriori apporti di nutrienti; pertanto, nel LCIA la categoria di impatto “eutrofizzazione” deve essere divisa in due sotto-categorie, ovvero eutrofizzazione in ambiente terrestre ed eutrofizzazione in ambiente acquatico.

La standardizzazione dell'eutrofizzazione avviene riportando i quantitativi delle sostanze inventariate ai kg di NO_3 - equivalenti oppure di PO_4^{3-} - equivalenti, in base ad un potenziale di eutrofizzazione.

Tossicità

Questa categoria include tutti gli effetti tossici diretti delle emissioni sugli esseri umani (Human toxicity) e sugli ecosistemi (l'eco-tossicità). Le emissioni, che possono essere potenzialmente tossiche, rilasciate dai sistemi agricoli o allevamenti sono:

- inquinanti atmosferici inorganici come NH_3 , SO_2 e NO_x ,
- sostanze utilizzate nella protezione delle colture,
- metalli pesanti.

Gli inquinanti atmosferici inorganici sono potenzialmente tossici per gli esseri umani a causa del loro contributo alla formazione di smog (Stanners e Bourdeau, 1995). Studi hanno dimostrato che nei sistemi agricoli almeno il 70% di SO_2 , NO_x , NH_3 , CO e le emissioni di particolato, sono rilasciate durante il periodi di massima

attività, ovvero in primavera e in estate. Inoltre, a causa della breve vita atmosferica di tali sostanze in queste condizioni climatiche, è giustificata la loro esclusione dalla categoria di impatto “tossicità” quando si analizzano appunto sistemi agricoli.

I prodotti fitosanitari sono sostanze applicate per poter migliorare la produttività dei sistemi agricoli. Tuttavia, a causa di alcuni fenomeni come: deriva, evaporazione, lisciviazione etc, una parte del prodotto applicato può generare un impatto sull'ambiente, sugli ecosistemi acquatici o anche sull'uomo (Hauschild, 2000). Per stimare la quantità di sostanze tossiche liberate, il loro destino nell'ambiente e l'effetto sugli ecosistemi e sull'uomo, sono stati creati diversi modelli (Spriensma, 1999; Guinée *et al.*, 1996; Huijbregts, 2001; Jolliet e Crettaz, 1997).

L'uso agricolo di minerali a base di fosfati come fertilizzanti e di materiali organici come liquami, fanghi di depurazione o compost come ammendanti può condurre a liberare nel suolo metalli pesanti. La presenza in questi materiali di metalli pesanti varia notevolmente a seconda della provenienza delle materie prime.

La tossicità (T) può essere suddivisa in: tossicità terrestre (T-t), tossicità delle acque dolci (FW-t), tossicità delle acque marine (MW-t) e umana (H-t)

L'ETP (Eco-Toxicity Potential) è espresso facendo riferimento ad una sostanza, l'1,4-diclorobenzene (1,4 DCB) e quindi l'unità di misura è 1,4DB-equivalenti. La tossicità di una generica sostanza i (TP_i) può essere espressa attraverso l'equazione:

$$TP_i = \frac{PC_i \times E_i}{PC_{rif} \times E_{rif}}$$

dove PC_i e PC_{rif} sono rispettivamente la concentrazione giornaliera prevista della sostanza i e di 1,4 DCB nell'ambiente. E_i e E_{rif} rappresentano il potenziale di tossicità della sostanza i e del 1,4 DCB.

Consumo di risorse, energia e materiali

Nelle metodologie LCIA attualmente disponibili il consumo delle differenti risorse

non rinnovabili è aggregato in un indicatore comune definito “consumo delle risorse” nella fase di standardizzazione.

Il consumo delle risorse non rinnovabili (A-d, Abiotic resource Depletion) viene calcolato come indicato da Guinée and Heijungs (1995):

$$A-d = \sum ADP_i \times M_i$$

$$ADP_i = \frac{DR_i}{(R_i)^2} \times \frac{(R_{rif})^2}{DR_{rif}}$$

dove i è una ipotetica risorsa, ADP_i il potenziale di esaurimento della sostanza i , M_i rappresenta la quantità totale della sostanza i , R_i la quantità rimanente o riserva e DR_i il tasso di estrazione annuale della risorsa i ; R_{rif} e DR_{rif} rappresentano la quantità rimanente o risorsa e il tasso di estrazione annuale dell'antimonio (sostanza di riferimento).

Tabella 2: Riepilogo delle categorie di impatto più comunemente utilizzate in LCA

Categoria d'impatto	Scala	Fattori di standardizzazione	Unità del valore standardizzato
Effetto serra	Globale Regionale Locale	GWP_i Global Warming Potential	kg di CO ₂ equivalenti
Assottigliamento della fascia di ozono	Globale Regionale Locale	ODP_i Ozone Depleting Potential	kg di triclorofluorometano (CFC-11) equivalenti
Acidificazione	Regionale Locale	AP_i Acidification potential	kg di SO ₂ equivalenti
Eutrofizzazione	Locale	EP_i Eutrophication Potential	kg di PO ₄ ³⁻ equivalenti
Ecotossicità terrestre	Locale	TP_i Toxicity Potential	kg di 1,4 DB equivalenti
Ecotossicità marina	Locale	TP_i Toxicity Potential	kg di 1,4 DB equivalenti
Ecotossicità delle acque dolci	Locale	TP_i Toxicity Potential	kg di 1,4 DB equivalenti
Tossicità umana	Globale Regionale Locale	TP_i Toxicity Potential	kg di 1,4 DB equivalenti
Sfruttamento delle risorse	Globale Regionale Locale	ADP_i Abiotic Depletion Potential	kg di Sb equivalenti

Endpoint

L'aggregazione degli indicatori di impatto in categorie e la loro ponderazione attraverso l'assegnazione di un punteggio finale (Ecopoint), può semplificare considerevolmente l'analisi dell'inventario e migliorarne l'interpretazione. Un Ecopoint rappresenta un millesimo del carico ambientale annuale per abitante europeo medio. Deve essere messo in evidenza che gli Ecopoint vanno interpretati come unità di carico ambientale, cioè più Ecopoint ottiene un processo, maggiore sarà il suo impatto ambientale. Tuttavia questo processo è ancora materia molto controversa dal momento che è soggetto a scelte arbitrarie. Molti metodi sono disponibili per raggiungere questo obiettivo (ad esempio EPS, Tellus, Ecoscarcity etc); in questo studio è stato scelto Ecoindicator 99 (Prè consultants, 2001) per rielaborare i dati originali nelle seguenti tre principali categorie di danno (endpoints): salute umana (HH, Human Health), qualità dell'ecosistema (EQ, Ecosystem Quality) e consumo delle risorse (RD, resource depletion). Per le ricerche sono stati adottati i valori standard di ponderazione (40-40-20 per HH, EQ e RD rispettivamente), dal momento che non sono emersi valide motivazioni per variarli.

Human Health

Per la determinazione del danno alla salute umana si utilizza il concetto di disability-adjusted life years (DALY) (Murray, 1994):

$$DALY=YLL+YLD$$

dove YLL sono gli anni di vita perduti calcolati moltiplicando il numero dei decessi per la speranza di vita all'età della morte, YLD sono gli anni perduti a causa della disabilità calcolata come segue:

$$YLD=Y \times L \times DW$$

dove Y è il numero dei casi di disabilità, L rappresenta il tempo medio della durata della patologia fino alla guarigione o alla morte, DW il punteggio di disabilità determinato dalla World Bank (Anand and Hanson, 1997), assegnando a ciascuna

forma di disabilità un punteggio di gravità variabile da 0 a 1, dove 0 equivale alla morte.

Ecosystem Quality

I danni alla qualità dell'ecosistema sono espressi come percentuale di specie viventi potenzialmente scomparse per via dell'emissione di sostanze tossiche emesse dal processo analizzato. Questo valore è stato assunto come 10% del totale delle specie potenzialmente danneggiate dalle sostanze inquinanti, poiché non tutte le specie sottoposte a condizioni di stress effettivamente scompaiono dall'areale considerato.

Resource Depletion

Infine il consumo di materie prime viene calcolato sulla base dell'energia spesa per la loro estrazione, poiché il consumo di quella quota di risorsa renderà necessarie future estrazioni dello stesso materiale per altri processi produttivi. Questo indicatore tiene conto degli stessi dati della categoria A-d (Abiotic resource depletion) ma esprime il consumo di energia per l'estrazione anziché il calo delle riserve espresso in sostanza equivalente.

Caratterizzazione e Normalizzazione

Dopo aver eseguito l'aggregazione e la standardizzazione per categorie di impatto dei dati di inventario, non è ancora possibile commentare l'importanza relativa dei valori trovati. Per il confronto fra gli scenari considerati si procede alla “caratterizzazione” degli impatti, assegnando in ogni categoria valore 100 allo scenario più impattante, e valori proporzionalmente più bassi agli altri scenari considerati.

Per valutare l'effetto dei processi considerati sul totale delle emissioni derivanti da attività umane in un determinato areale, si procede alla normalizzazione dei dati, raffrontando gli effetti al dato di riferimento per l'entità geografica considerata (es.

singola città, regione, stato, UE, etc.). Conoscendo la densità di popolazione, è anche possibile esprimere l'impatto rispetto a quello prodotto dal singolo abitante ricadente all'interno dell'entità geografica prescelta.

È pertanto possibile che un valore intrinsecamente elevato di un singolo indicatore rappresenti solo un piccolo contributo al totale degli effetti ambientali prodotti in un'area, oppure che un basso valore corrisponda ad un importante impatto ambientale.

Interpretazione e miglioramento (life cycle engineering)

La fase di miglioramento propone delle alternative per il sistema in esame, nei sotto-processi che hanno evidenziato un contributo importante sull'impatto finale. Tali modifiche vanno valutate con metodologia analoga a quella fin qui descritta per verificare l'effettiva riduzione dell'impatto.

Scenari

Lo scopo principale di questa analisi è confrontare l'impatto ambientale derivante dalla coltivazione di cinque colture a destinazione energetica per poter determinare quale genera il minor carico ambientale, in un areale di coltivazione nord-italiano.

Per classificare e quantificare gli impatti ambientali è stata applicata la metodologia “Life Cycle Assessment” (International Organization Standardization, 1997), precedentemente dettagliata. Il software utilizzato per l'elaborazione dei dati e per analizzare i differenti scenari è il SimaPro 7.0 (PRè Consultants, Amersfoort, NL). Per la determinazione delle categorie di impatto e per il loro sviluppo la metodologia utilizzata è stata la CML-2 (Institute of Environmental Sciences, Leiden University, NL). Per l'aggregazione dei dati nelle 3 macrocategorie e la loro successiva ponderazione la metodologia applicata è Ecoindicator-99 (PRè Consultants, Amersfoort, NL). I dati di riferimento per i calcoli LCA sono stati rilevati da misurazioni dirette in campo, e implementati, ove incompleti o mancanti, con riferimenti bibliografici ricavati da manuali (hoepli e ribaudo-edagricole) e dal database specifico per studi LCA Ecoinvent 1.1 (ECOINVENT - Swiss Centre for Life Cycle Inventory).

Le colture energetiche oggetto di questa tesi sono state selezionate in funzione della destinazione energetica finale, scegliendo quindi specie con differenti sbocchi energetici, ed in base alla durata dell'impianto, scegliendo sia specie poliennali che annuali.

La scelta delle colture è stata effettuata in funzione dei dati ottenuti da analisi precedentemente effettuate dal DiSTA permettendo la selezione delle colture più interessanti dal punto di vista ambientale (Fazio *et al*, 2008).

Per la produzione di biomassa ligno-cellulosica sono state scelte: il *Sorghum bicolor* L. Moench (sorgo da fibra) specie a ciclo primaverile-estivo; l'*Arundo donax* L.(canna comune), il *Panicum virgatum* L. (switchgrass), il *Miscanthus x*

giganteus Greef et Deuter (Miscanto), e il *Cynara cardunculus* L. (Cardo) tutte poliennali.

Per la filiera del biodiesel la scelta è ricaduta su *Helianthus annuus* (girasole), e *Brassica napus* L. (colza). Infine per la produzione di etanolo le specie considerate sono state *Zea Mays* L. (mais) e *Triticum* spp L. (frumento).

I carichi ambientali determinati negli scenari delle poliennali durante l'intero ciclo produttivo sono stati sommati e successivamente divisi per il numero di anni dell'intero ciclo ovvero 5 per il cardo (da esperienza diretta del DiSTA a seguito di una prova sperimentale) e 15 per le altre specie; questa durata è teorica ed è stata determinata sulla base di dati bibliografici (Bonari, 2006; Christian e Elbersen, 1998). In questo modo i carichi ambientali generati nelle fasi di impianto, possono essere suddivisi nei diversi anni produttivi permettendo un confronto con le specie annuali (impatto annuo equivalente).

Gli scenari sono stati confrontati sulla base di due unità funzionali:

- l'unità di superficie (ha)

permette di valutare l'impatto ambientale generato in funzione della superficie investita a tali colture o eventualmente anche il confronto con sistemi agricoli canonici.

- l'unità di energia prodotta (GJ)

permette di confrontare le specie prese in esame in funzione dell'unità di energia ottenibile e permette il confronto con altri sistemi di produzione energetica.

Tabella 3: Colture dedicate su cui è stato valutato il bilancio ambientale, per conversione termochimica si intendono diverse destinazioni, dalla combustione diretta per la produzione di energia e calore, alla gassificazione, fino alla produzione di BTL diesel ed Etanolo di seconda generazione.

Coltura	Specie	Biomassa	Destinazione
Switchgrass	<i>Panicum virgatum</i>	Lignocellulosica	Conversione termochimica
Canna comune	<i>Arundo donax</i>	Lignocellulosica	Conversione termochimica
Miscanto	<i>M. x giganteus</i>	Lignocellulosica	Conversione termochimica
Cardo	<i>Cynara Cardunculus</i>	Lignocellulosica	Conversione termochimica
Sorgo da fibra	<i>Sorghum bicolor</i>	Lignocellulosica	Conversione termochimica
Girasole	<i>Helianthus annuus</i>	Oleaginosa	Biodiesel
Colza	<i>Brassica Napus</i>	Oleaginosa	Biodiesel
Frumento	<i>Triticum spp.</i>	Cereale	Etanolo
Mais	<i>Zea mays</i>	Cereale	Etanolo

Nella tabella 4 vengono riportati i valori delle rese e gli output energetici generati dalle colture prese in esame

Tabella 4: output totali considerati. Sg=Switchgrass; CC=Canna Comune; Mi=Miscanto; Ca=Cardo; SF=Sorgo da Fibra; Ma=Mais; Fr= Frumento; Co=Colza; Gi=Girasole.

OUTPUT	UNITA'	POLIENNALI					ANNUALI			
		Sg ¹	CC ¹	Mi ¹	Ca ²	SF ¹	Ma ³	Fr ³	Co ⁴	Gi ⁴
Biomassa	t ha ⁻¹	12	23	18	5	22	-	-	-	-
Granella	t ha ⁻¹	-	-	-	-	-	10	6	2,4	3,5
Energia	GJ	208,8	400,2	313,6	85,5	382,8	97,2	58,3	38,8	56,7

¹potere calorifico inferiore (PCI) 17,4 GJ/t;

²PCI 17,1 GJ/t

³contenuto in amido 60%; efficienza di conversione in etanolo 60%; PCI etanolo = 27 GJ/t

⁴contenuto in olio del 45%; PCI = 36 GJ/t.

Nella successiva tabella 5 sono state riportate sinteticamente tutte le lavorazioni e le operazioni colturali svolte durante la fase di impianto e le fasi successive, ovviamente per le poliennali la fase d'impianto corrisponde al primo anno, mentre le fasi successive sono svolte annualmente per tutta la durata della coltura, per le annuali la fase d'impianto e le fasi successive si svolgono in una sola annata; i dati sono riportati in maniera dettagliata nell'allegato A.

Tabella 5: Tabella riepilogativa degli input immessi nell'ecosistema durante i processi produttivi

INPUT	UNITA'	POLIENNALI				ANNUALI				
		<i>Sg</i> ¹	<i>CC</i> ¹	<i>Mi</i> ¹	<i>Ca</i> ²	<i>SF</i> ¹	<i>Ma</i> ³	<i>Fr</i> ³	<i>Co</i> ⁴	<i>Gi</i> ⁴
FASE D'IMPIANTO										
Aratura	cm	40	40	40	40	35	40	35	35	40
Erpicature	n. ha ⁻¹	3	2	3	3	3	3	3	3	2
Semente	kg ha ⁻¹	8	-	-	5	6	25	150	7	6
Rizomi	n. ha ⁻¹	-	10000	20000	-	-	-	-	-	-
Assolcatura e posa	n. ha ⁻¹	-	1	1	-	-	-	-	-	-
Comcim. (P ₂ O ₅)	kg ha ⁻¹	200	240	240	120	68	96	60	60	80
Diserbo e trattamenti	kg ha ⁻¹	5	3	3	3	5	6	3	3	3
Sarchiatura	n. ha ⁻¹	-	-	-	-	1	1	-	1	1
Carburante	L ha ⁻¹	116	118	118	120	120	120	110	110	116
FASI SUCCESSIVE										
Irrigazione	n. ha ⁻¹	-	-	-	-	-	3	-	-	-
Comcim. (N)	kg ha ⁻¹	92	106	106	92	115	207	115	92	92
Raccolta	Tipo	Imball.	Falcia – trincia – caricatura				Mietitrebbiatura			
Carburante	L ha ⁻¹	50	53	50	45	44	69	40	40	44

Analisi dell'intera filiera

L'analisi di filiera ha due scopi principali:

- valutare l'incidenza della fase agricola su tutto il processo produttivo, per capire se effettivamente agire per ridurre gli impatti dell'agricoltura possa portare a significativi benefici sull'intera catena di produzione bioenergetica
- individuare il miglior scenario possibile, sia in senso assoluto, sia per singolo comparto bioenergetico (biocarburanti di I o II generazione, conversione termochimica, etc.) in funzione delle colture impiegate nella produzione primaria di biomassa

I dati riguardanti gli impatti delle fasi a valle della coltivazione sono stati rilevati da fonti bibliografiche (CONCAWE, GRTN, ECOINVENT) da cui sono stati assunti i valori di riferimento che comprendono tutti i processi Well to Tank, ovvero gli steps di trasformazione e di trasporto fino alla distribuzione (in rete per quanto riguarda l'elettricità, alla pompa per i biofuel).

Purtroppo però, ad eccezione delle valutazioni sulle emissioni di gas serra, gli studi presentano valori discordanti ed incompleti per quanto riguarda i restanti indicatori ambientali, pertanto lo studio delle fasi successive a quella agricola si è limitato all'analisi del Global Warming Power. Va ricordato che questo indicatore ambientale è comunque il più importante in un'ottica di filiera, poiché si fa riferimento ad un settore (quello energetico) che è largamente il maggior responsabile a livello mondiale dell'emissione di gas climalteranti. Nella fase di discussione sarà affrontato anche il controverso problema delle emissioni di N₂O (gas serra) dai terreni coltivati.

Per le specie da granella l'analisi su base energetica è già riferita al GJ di biofuel (Etanolo per i cereali, olio per le oleaginose, considerando che il rapporto energetico fra biodiesel e olio è circa 1:1), mentre per le specie lignocellulosiche si fa riferimento al PCI della biomassa ancora da trasformare, nell'analisi dell'intera filiera saranno applicati dei coefficienti di conversione a seconda dell'efficienza di trasformazione di ogni tecnologia applicata, nello specifico: 44% per BTL diesel (IFEU, 2007); Per etanolo da conversione termochimica 40% (bright, 2008) da conversione enzimatica 57% (CONCAWE, 2007); per elettricità 48% (CONCAWE, 2007). In quest'ultimo caso è stato preso come riferimento lo scenario migliore proposto dallo studio CONCAWE, altri scenari hanno mostrato efficienze anche inferiori al 35%, riferite però a sistemi di conversione meno innovativi rispetto a quello considerato; siccome tutti gli scenari riferiti ai biofuel di seconda generazione sono molto innovativi, si è ritenuto opportuno considerare anche per la generazione elettrica lo scenario BAT (Best Available Technology).

Per poter considerare il credito di CO₂ dovuto all'utilizzo di fonti rinnovabili

occorre però comparare le emissioni anidride carbonica dei biocombustibili con quella dei combustibili fossili, che oltre alle emissioni di filiera sono caratterizzati da forti emissioni di gas climalteranti anche durante l'utilizzo (combustione finale, sia nei veicoli, per i carburanti, che negli impianti di generazione elettrica).

Anche i combustibili di origine non fossile emettono gas serra in fase di combustione finale, tuttavia il bilancio può considerarsi pari a zero poiché la CO₂ emessa in fase di utilizzo è pari a quella immagazzinata durante il ciclo di vita delle piante, pertanto sul bilancio delle emissioni grava soltanto la filiera di produzione.

I dati di riferimento per i combustibili fossili sono stati rilevati nello studio CONCAWE 2007, sommando le emissioni specifiche (g/MJ di CO₂ eq) dei carburanti in fase di combustione (benzina, diesel e gas metano, quest'ultimo per la generazione elettrica) alle rispettive emissioni di filiera, per la generazione elettrica ovviamente è stata considerata l'efficienza di conversione (pari al 57% nello studio concawe). Non è stata considerata la tecnologia di cogenerazione (CHP) poiché le dimensioni e le tipologie d'impianto sono più variabili rispetto alla sola generazione di elettricità, è tuttavia risaputo che il sistema CHP aumenta l'efficienza di conversione fino al 50%, ma è altrettanto vero che questa differenza è raggiungibile sia per gli impianti tradizionali sia per quelli a biomassa quindi nel confronto relativo fossile-rinnovabile il risultato non cambia, potrebbe invece variare significativamente la differenza fra biocombustibili ed elettricità, ma questo punto sarà trattato nelle discussioni.

RISULTATI E DISCUSSIONI

Analisi su base areica (ha)

I valori espressi nei seguenti grafici sono espressi sull'unità di superficie (ha).

Standardizzazione

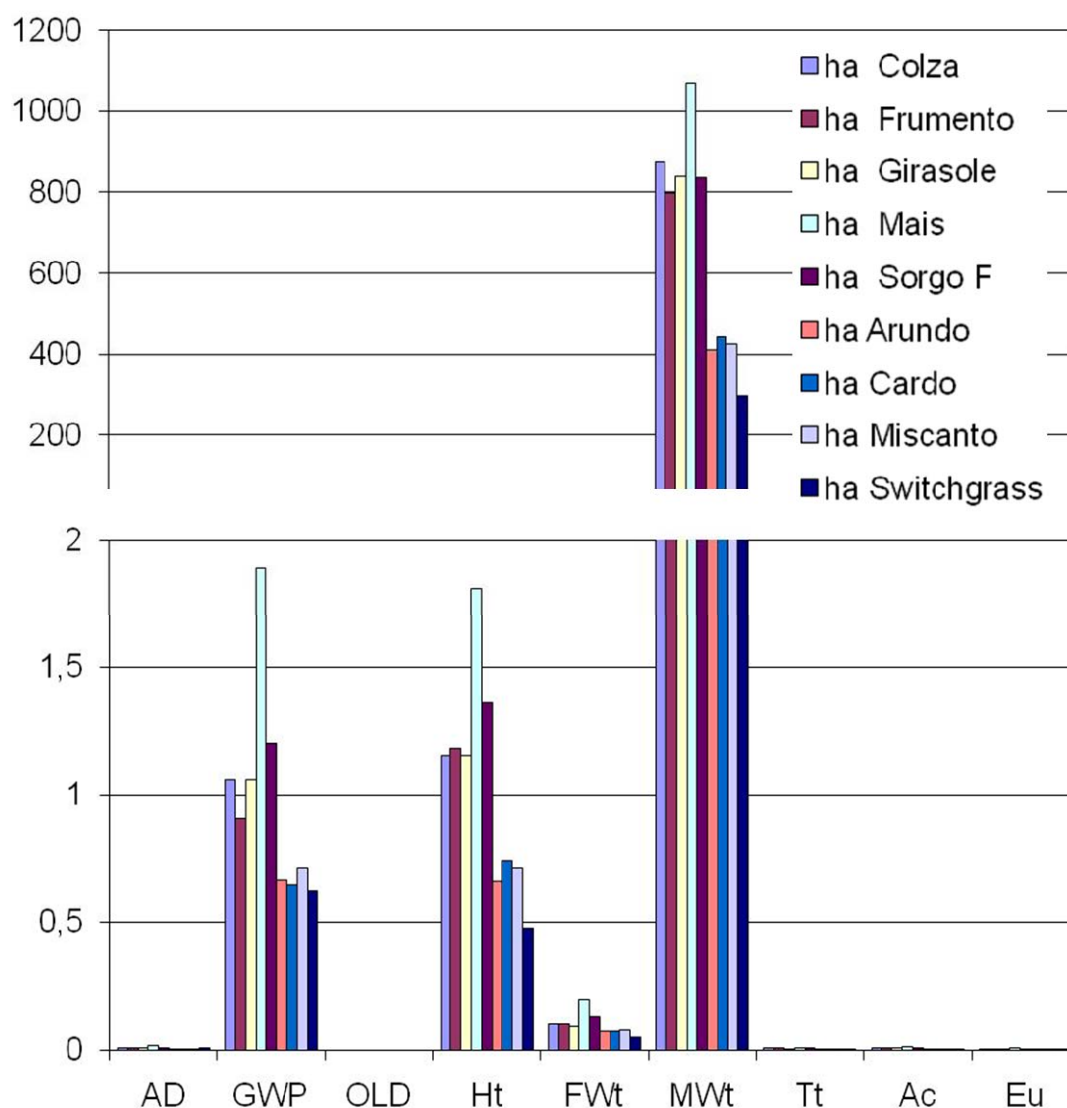


figura 19: Livelli di impatto per singola categoria relativi alla fase agricola. Valori espressi in kg equivalenti, della sostanza di riferimento per ogni categoria, sull'unità di superficie (ha); A-d = Abiotic depletion, GWP = Global Warming Potential, OLD = Ozone Layer Depletion, H-t = Human toxicity, FW-t = Fresh Water toxicity, MW-t = Marine Water toxicity, T-t = Terrestrial toxicity, Ac = Acidification, Eu = Eutrophication

La figura 19 esprime i valori delle varie categorie di impatto standardizzati, ovvero riportati a kg equivalenti di sostanza di riferimento emessi per ettaro per ogni categoria (come precedentemente illustrato nella metodologia). E' evidente come la

categoria più colpita dai processi agricoli sia “eco-tossicità delle acque marine” (MW-t). La causa di tale impatto è da ricercare nei vari processi coinvolti nella produzione da cui si evince che la fase che genera il maggior impatto è quella di impianto e più precisamente la concimazione fosfatica, per l’emissione di composti altamente inquinanti durante la fase di produzione industriale del fertilizzante. Un’ulteriore conferma si ottiene consultando l’inventario e notando che la coltura (mais) con la concimazione fosfatica più elevata (95 kg/ha di P_2O_5) risulta essere anche la più rappresentata nella categoria. La coltura con il valore più basso è lo switchgrass, nonostante all’impianto siano stati distribuiti 200 Kg/ha di P_2O_5 . Questo si spiega esaminando la durata dell’impianto: nello switchgrass l’impatto generato dalla somministrazione nella fase di impianto di 420 Kg/ha di perfosfato triplo (0 -46-0) viene ripartito lungo l’intero ciclo poliennale (15 anni) il che corrisponde ad una somministrazione annua equivalente di circa 13,5 kg/ha di anidride fosforica.

Caratterizzazione

Nel grafico 20 i valori standardizzati sono stati caratterizzati, ovvero gli impatti sono raffrontati (%) allo scenario più impattante per ogni singola categoria.

Le colture annuali, rispetto alle poliennali, risultano più gravanti sull’ambiente in tutte le categorie considerate. Questo andamento è imputabile alla durata annuale che non permette di diluire i carichi ambientali legati alla fase d’impianto.

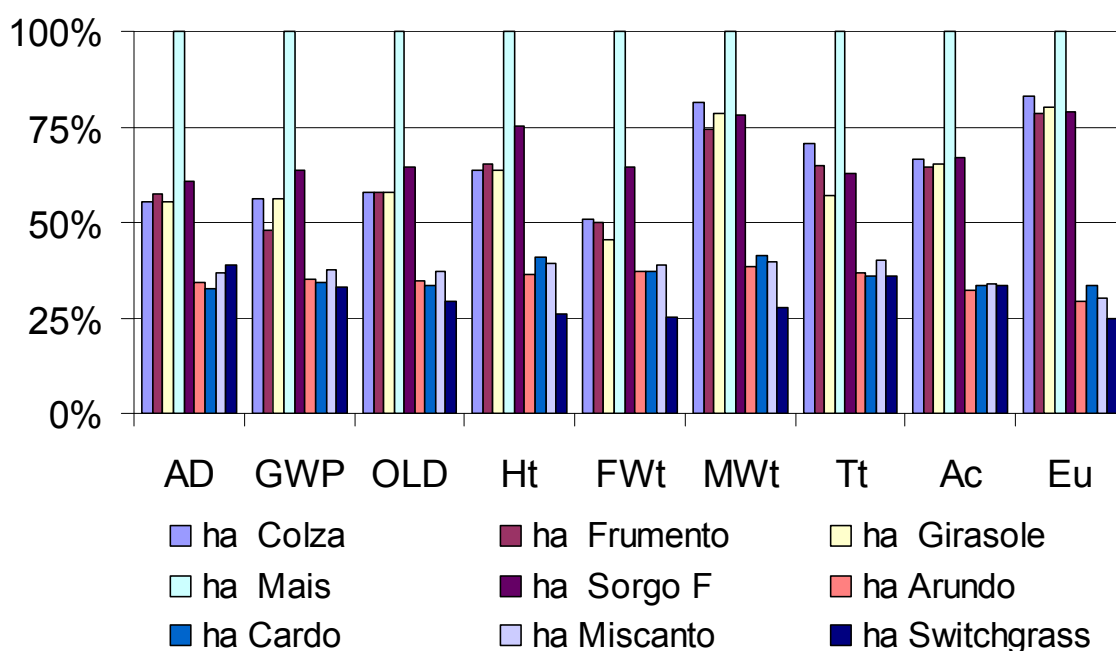


Figura 20: Livelli di impatto per singola categoria relativi alla fase agricola. Valori espressi sull'unità di superficie (ha). Gli impatti sono espressi come percentuale dello scenario di maggior impatto. A-d = Abiotic depletion, GWP = Global Warming Potential, OLD = Ozone Layer Depletion, H-t = Human toxicity, FW-t = Fresh Water toxicity, MW-t = Marine Water toxicity, T-t = Terrestrial toxicity, Ac = Acidification, Eu = Eutrophication

I maggiori input richiesti come ad esempio: le ingenti quantità di urea distribuita, la tipologia di raccolta energicamente più dispendiosa e la necessita di effettuare interventi irrigui, rendono il mais la coltura più gravante sull'ecosistema su tutte le categorie considerate.

Le altre annuali, rispetto al mais, attestano su valori dell'impatto dal 20 al 40% più bassi nelle diverse categorie. Generalmente è il sorgo la seconda coltura più impattante, ad eccezione di alcune categorie, mentre le altre annuali fra loro presentano differenze non significative.

Le colture poliennali presentano incidenze molto basse in tutte le categorie di impatto. Lo switchgrass mostra i risultati migliori (a minore impatto) sulla maggior parte delle categorie (H-t, MW-t e FW-t, “eutrofizzazione”, “assottigliamento della fascia di ozono” e “riscaldamento globale”). Questi bassi impatti ottenuti rispetto alle altre poliennali sono riconducibili a due ragioni principali: la minore incidenza della concimazione fosfatica e la differente tecnica di propagazione (Il trapianto

dei rizomi genera maggiori carichi ambientali rispetto alla semina), dovuti alle maggiori operazioni colturali richieste nel confronto con arundo e miscanto, e la maggior durata dell'impianto rispetto al cardo.

Normalizzazione

Assumendo come entità geografica interessata l'Europa occidentale (EU-15), conoscendo il quantitativo totale delle emissioni annuali generate dall'attività umana in questo areale ed avendo a disposizione il numero di abitanti europei (371·466·000 abitanti, fonte: Eurostat) si procede alla normalizzazione dei dati standardizzati.

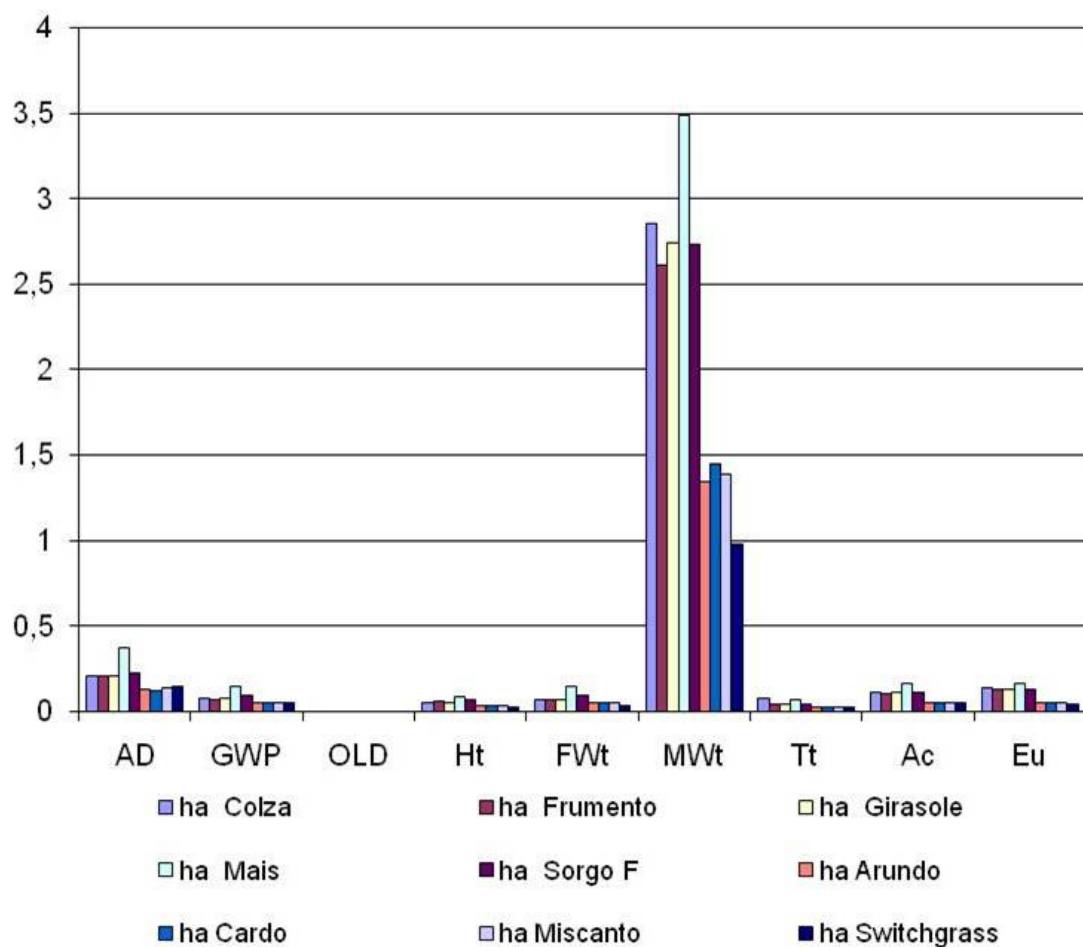


Figura 21: Livelli di impatto relativi alla fase agricola. Valori espressi in abitante europeo medio eq. sull'unità di superficie (ha). A-d = Abiotic depletion, GWP = Global Warming Potential, OLD = Ozone Layer Depletion, H-t = Human toxicity, FW-t = Fresh Water toxicity, MW-t = Marine Water toxicity, T-t = Terrestrial toxicity, Ac = Acidification, Eu = Eutrophication

Il grafico in figura 21 riporta l'impatto generato nelle varie categorie in abitanti europei equivalenti; ad esempio la coltivazione di un ettaro di switchgrass nella categoria “ecotossicità marina” genera un carico ambientale pari a quello generato da 1 abitante europeo in un anno.

Da questo grafico emerge come la seconda categoria d'impatto maggiormente interessata dagli agro-sistemi risulti essere “sfruttamento delle risorse” (A-d). Questo è dovuto al consumo di combustibili fossili per le operazioni meccanizzate e alla forte richiesta di energia che si genera durante il processo produttivo dell'urea. Si noti come la differenza relativa fra le diverse categorie d'impatto sia molto più ridotta rispetto ai dati standardizzati; le emissioni infatti non sono più valutate sulla base del loro valore assoluto (kg), ma rapportate a quelle medie di un abitante europeo. L'impatto relativo all'ecotossicità marina risulta comunque essere il più elevato, con valori compresi fra 1 e 3,5 abitanti equivalenti, nonostante l'elevato valore di emissione, compreso fra 200 e 1000 t di 1,4 DB-eq, evidenziando come il valore medio di emissione degli abitanti europei per la categoria MW-t sia di per sé elevato.

Single Score

Utilizzando la metodologia Ecoindicator 99 (EI-99) è stato possibile aggregare tutte le emissioni in 3 macrocategorie e valutare l'impatto globale di ciascun processo mediante l'assegnazione di un punteggio: Ecopunti.

L'ecopunto rappresenta un millesimo del carico ambientale annuale di un abitante europeo medio. Va ricordato che gli ecopunti esprimono un danno ambientale, per cui valori più elevati corrispondono a maggiori impatti.

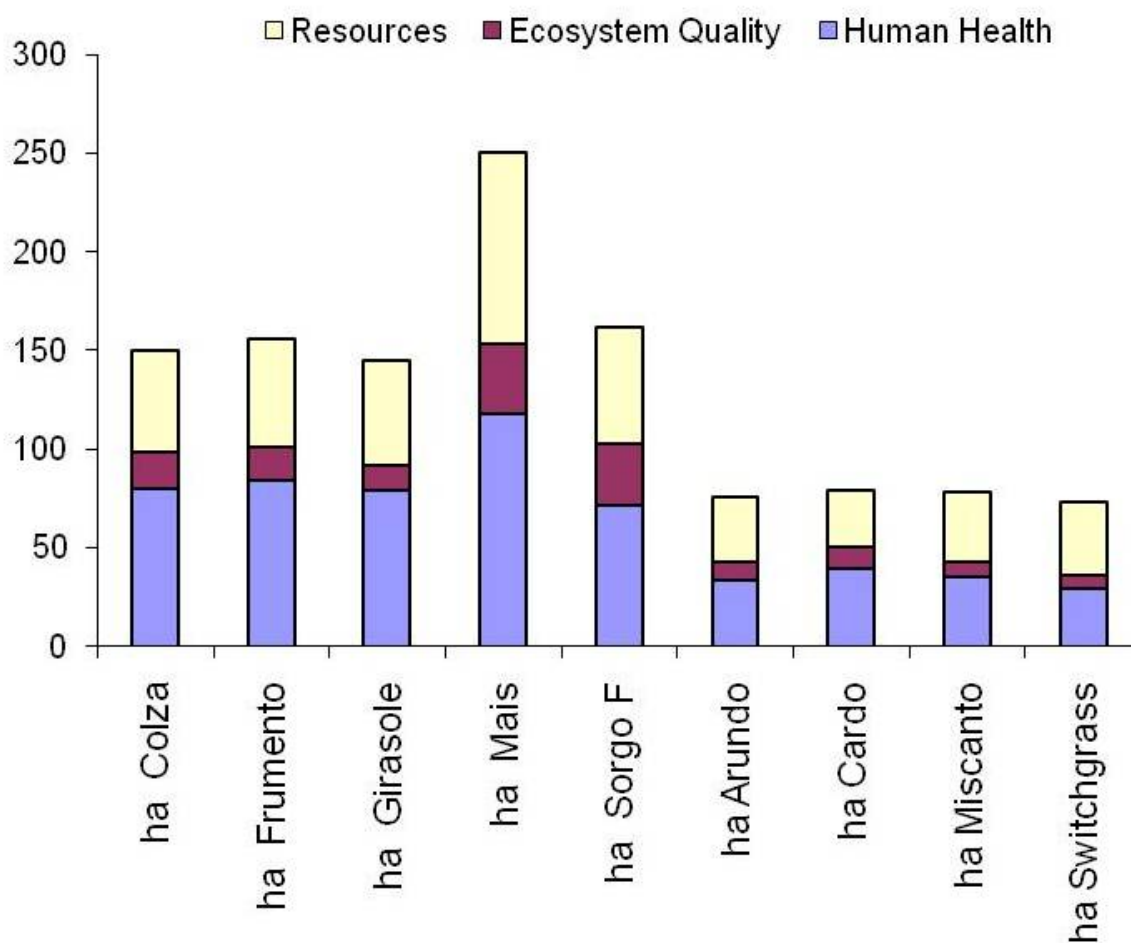


Figura 22: Livelli di impatto rappresentati in 3 macrocategorie ed espressi sull'unità di superficie (ha). I risultati sono espressi in ecopunti

L'analisi per macrocategorie ricalca all'incirca l'andamento dei grafici precedenti, evidenziando il minor impatto generato dalle colture poliennali rispetto alle annuali. Tra le annuali il mais rimane la più impattante, mentre le altre si attestano su valori intermedi fra le poliennali ed il mais, da notare come, ad eccezione del mais, le differenze fra le annuali risultino minime, analogamente anche fra le poliennali il gap risulta non significativo.

E' interessante notare come le principali macrocategorie colpite quasi in maniera analoga dal processo produttivo siano la "salute umana" e la categoria "sfruttamento delle risorse", mentre la "qualità dell'ecosistema", nonostante gli elevati indicatori di ecotossicità, risulta nettamente meno significativa, probabilmente per via della diversa metodologia che include nella valutazione dei

danni sulla salute umana anche dei composti che non provocano danno immediato alla salute (tossicità) ma a lungo termine. Inoltre, mentre gli indicatori standardizzati e normalizzati con CML valutano l'impatto su un midpoint (quantità di sostanza emessa, responsabile di un determinato effetto ambientale), la metodologia EI-99 valuta il danno potenziale sul "target" della sostanza inquinante (endpoint). Dal confronto fra i grafici si evince quindi come elevati valori di emissione sulle categorie inerenti l'ecotossicità non si traducano di fatto in potenziali danni di analoga portata.

Analisi su base energia

I seguenti grafici riporta i valori standardizzati ottenuti dall'analisi in funzione dell'unità di energia prodotta (GJ).

Standardizzazione

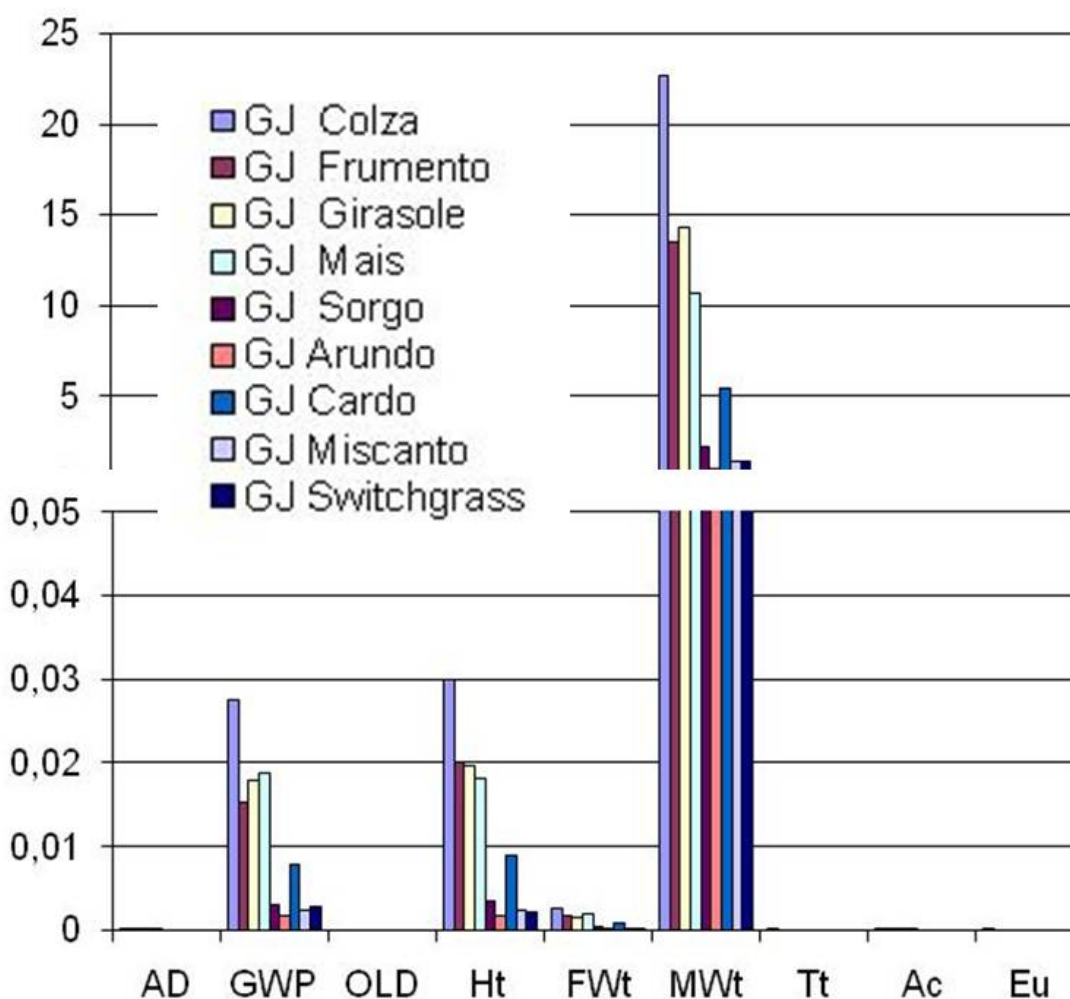


Figura 23: Livelli di impatto per singola categoria relativi alla fase agricola. Valori espressi in kg equivalenti, della sostanza di riferimento per ogni categoria, sull'unità di energia prodotta (GJ). A-d = Abiotic depletion, GWP = Global Warming Potential, OLD = Ozone Layer Depletion, H-t = Human toxicity, FW-t = Fresh Water toxicity, MW-t = Marine Water toxicity, T-t = Terrestrial toxicity, Ac = Acidification, Eu = Eutrophication

Osservando il grafico dei valori standardizzati si determina che la categoria di impatto più colpita è l'eco-tossicità marina (MW-t), confermando i risultati ottenuti su base ettaro. Differente risulta essere la distribuzione delle colture all'interno di tale categoria. Il colza sembra generare un impatto nettamente

superiore alle altre annuali; questo è dovuto alla differenza di produzione energetica tra le due specie. Seguono frumento e girasole senza differenze significative fra loro, mentre il mais, più produttivo, ripartisce il carico sull'ecosistema su una quantità maggiore di energia prodotta con conseguente abbattimento delle emissioni per GJ, risultando la specie meno impattante fra le colture da granella.

Sempre fra le annuali, interessantissima la performance del sorgo, che si attesta su livelli di impatto molto bassi, addirittura inferiori a cardo, e paragonabili con quelli delle altre 3 poliennali, nonostante un carico ambientale per ettaro relativamente elevato. Questo è dovuto all'elevata produttività di questa specie, unica fra le annuali destinata a produzione lignocellulosica.

Anche fra le poliennali, che pure mostrano livelli di carico sull'ambiente nettamente inferiori alle annuali, la performance produttiva influenza il risultato dell'impatto per GJ; l'arundo risulta infatti la coltura meno impattante, mentre il cardo quella più gravante. Interessante la scarsa differenza fra miscanto e switchgrass nonostante il primo produca quasi il 50% in più di biomassa e quindi di energia per ettaro rispetto al primo.

Caratterizzazione

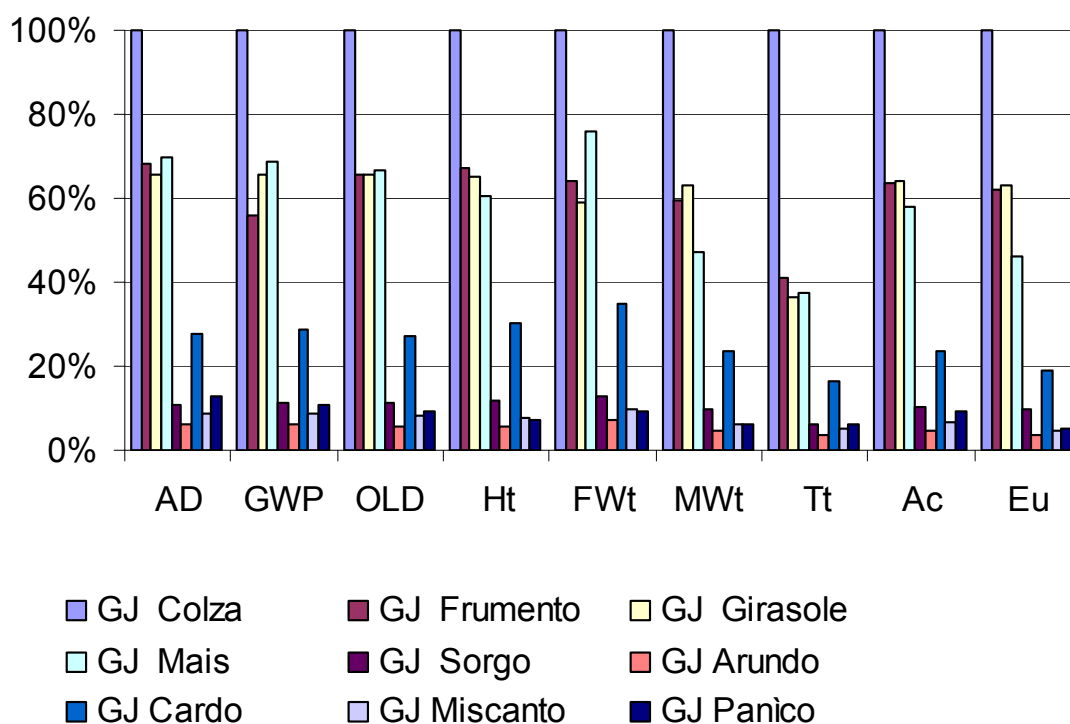


Figura 24. Livelli di impatto per singola categoria relativi alla fase agricola. Valori espressi sull'unità di energia prodotta (GJ). Gli impatti sono espressi come percentuale dello scenario di maggior impatto. A-d = Abiotic depletion, GWP = Global Warming Potential, OLD = Ozone Layer Depletion, H-t = Human toxicity, FW-t = Fresh Water toxicity, MW-t = Marine Water toxicity, T-t = Terrestrial toxicity, Ac = Acidification, Eu = Eutrophication

In linea di massima, l'output energetico, determinato dalla produttività della coltura, è un indice molto più discriminante fra le specie rispetto all'input, che è invece determinato dal sistema di coltivazione. In altre parole, in termini di resa energetica, la differenza fra le colture è molto più legata al livello di produttività che non al sistema di coltivazione.

Tra le colture annuali da granella (eccettuato cioè il sorgo da fibra) il mais arriva ad essere meno impattante nelle categorie: "tossicità umana", "eco-tossicità marina", "acidificazione" ed "eutrofizzazione", le differenze rispetto a colza sono notevoli (dal 30 ad oltre il 70% in meno) ma rispetto a frumento e girasole il mais presenta gap non significativi in molte categorie nonostante un output energetico quasi

doppio rispetto ad entrambe.

Sorprendente è il traguardo del sorgo che, oltre ad essere la meno gravante sull'ecosistema tra le colture annuali, si pone in concorrenza diretta con le colture poliennali esaminate e supera abbondantemente il cardo mostrandosi meno gravoso sull'ambiente di almeno il 50% rispetto a quest'ultimo in ogni categoria considerata (rispetto a colza le riduzioni d'impatto superano il 90%). Il merito di questo notevole decremento è dato dalla mole dell'output pari a 380 GJ che permette una notevole riduzione del carico ambientale per GJ prodotto. Questo dimostra come l'efficienza del sistema sia notevolmente più elevata se si utilizza a scopo energetico l'intera biomassa prodotta, rispetto alla sola granella; dati non pubblicati infatti hanno mostrato performance del mais comparabili a quelle del sorgo se si ipotizza di utilizzare anche gli stocchi ad uso energetico, a differenza di quanto ipotizzato nel presente studio.

Nel comparto delle colture poliennali la situazione appare quasi completamente ribaltata grazie all'elevata produttività media della canna comune (> 400 GJ) rispetto allo switchgrass ed al miscanto; nonostante la differenza produttiva, lo switchgrass esprime livelli di impatto di pochi punti percentuali superiori alla canna comune, e praticamente identici al miscanto nelle categorie: “tossicità umana”, “eco-tossicità nelle acque dolci” e “eco-tossicità marina” con differenze attorno al 3%, mentre nella categoria “eutrofizzazione” i punti percentuali salgono a 4. Particolare interesse suscitano queste minime differenze, riscontrate anche nell'impatto su base areica, soprattutto per l'ecotossicità marina, che risulta essere la più colpita dai processi agricoli, poiché la scelta fra le tre colture poliennali può essere ragionevolmente effettuata indipendentemente dall'impatto ambientale atteso, basandosi su altri indicatori di tipo economico e pratico.

Normalizzazione

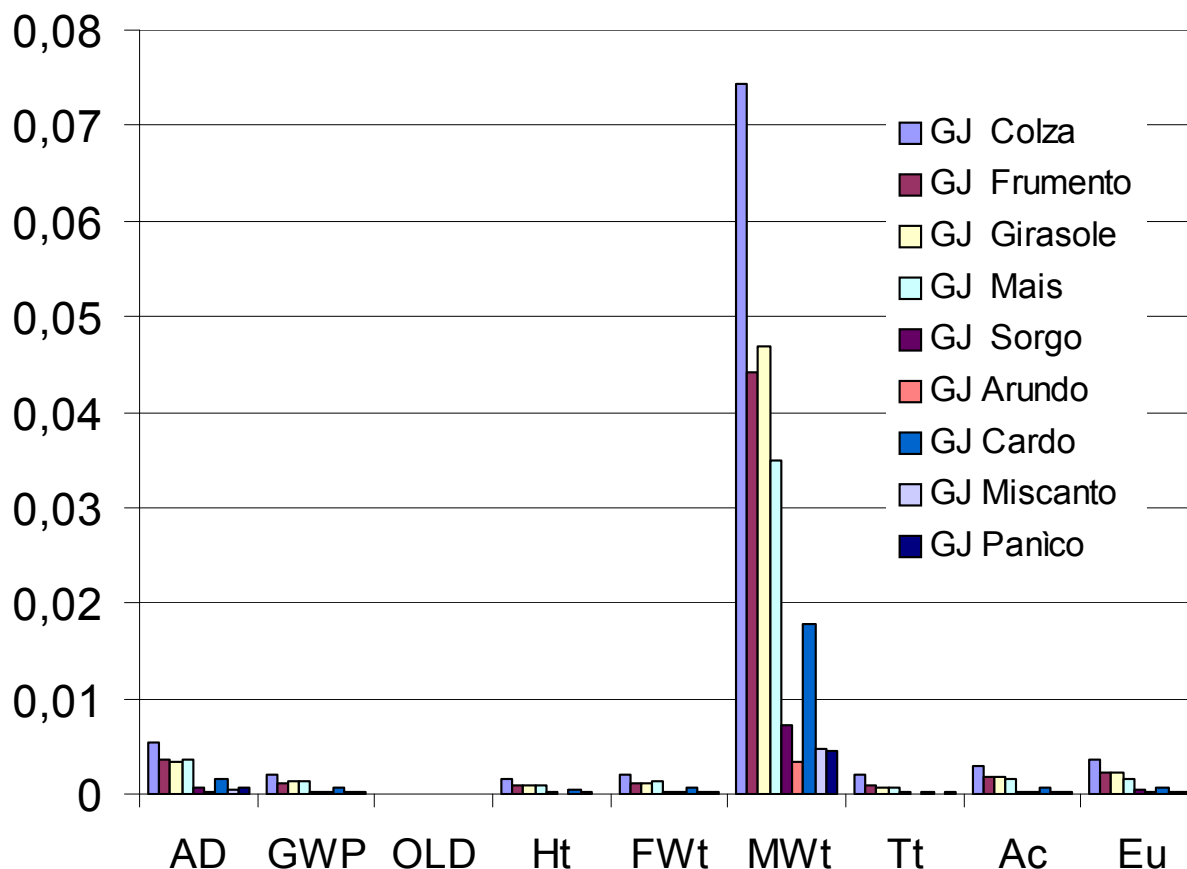


Figura 25. Livelli di impatto per singola categoria relativi alla fase agricola. Valori espressi in abitante medio europeo equivalente sull'unità di energia (GJ). A-d = Abiotic depletion, GWP = Global Warming Potential, OLD = Ozone Layer Depletion, H-t = Human toxicity, FW-t = Fresh Water toxicity, MW-t = Marine Water toxicity, T-t = Terrestrial toxicity, Ac = Acidification, Eu = Eutrophication

Normalizzando i risultati vengono ricalcate le tendenze già evidenziate su base ettaro in cui l'eco-tossicità marina è apparsa come la categoria più danneggiata dai processi agricoli. Analogamente ai risultati ottenuti su base ettaro, nei dati normalizzati il gap fra la categoria più influenzata e le altre categorie d'impatto risulta molto più ridotta, per gli stessi motivi discussi riguardo la normalizzazione su base ettaro.

La classifica tra le colture invece varia seguendo le tendenze evidenziate nei grafici di standardizzazione e caratterizzazione precedentemente esposti, dove la coltura più impattante risulta essere il colza.

Single Score

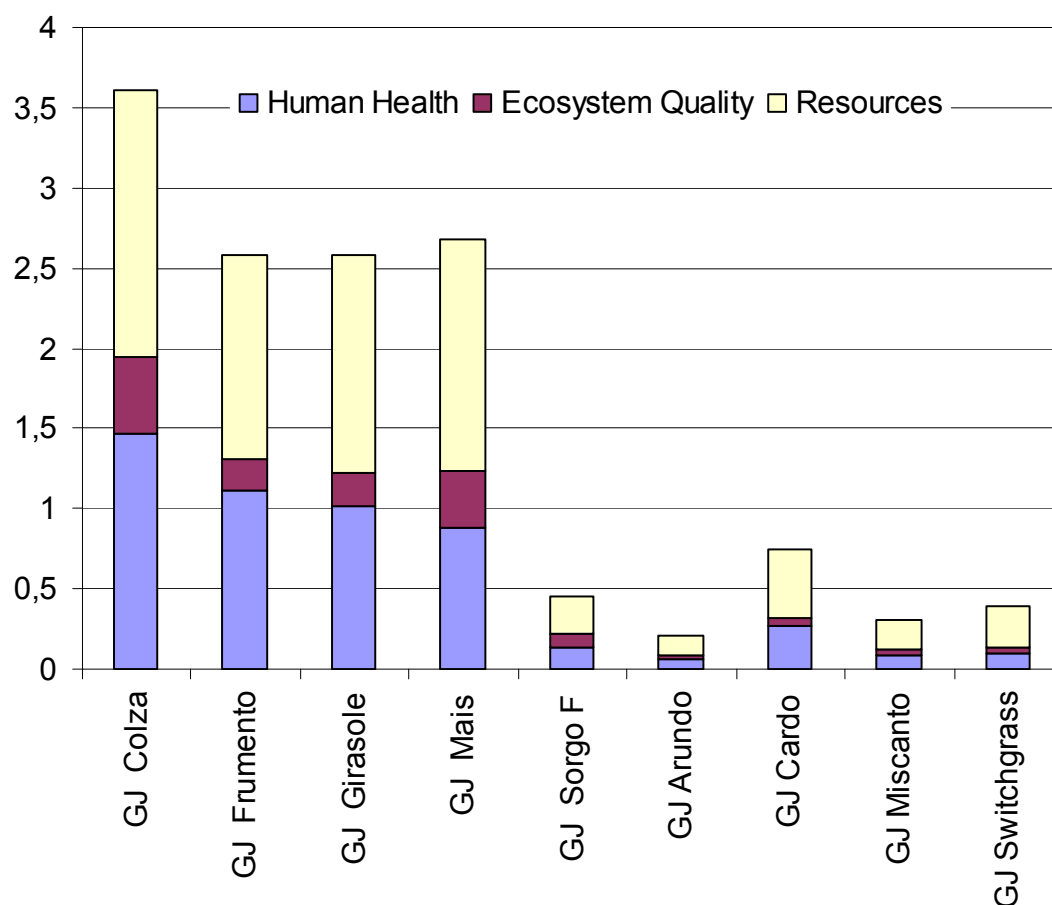


Figura 25. Livelli di impatto rappresentati in 3 macrocategorie ed espressi sull'unità di energia prodotta(GJ). I risultati sono espressi in Ecopunti

Sintetizzando i risultati fin ora ottenuti in ecopunti si può immediatamente notare come la canna comune risulti la coltura più performante per unità di energia prodotta.

Le colture annuali si discostano fortemente dalle poliennali a causa della combinazione di due importanti fattori: la bassa produttività e la breve vita economica. Anche il sorgo, che pure mostra valori simili alle poliennali, risulta essere leggermente meno sostenibile rispetto ad esempio allo switchgrass, pur avendo una resa energetica quasi doppia rispetto a quest'ultimo.

Da notare anche l'inversione di tendenza all'interno delle tre macrocategorie fra le annuali: il gap di frumento e girasole rispetto a mais risulta minimo, poiché molte delle categorie su cui il mais era significativamente meno gravante sull'ambiente

rispetto alle altre due colture vengono in quest'analisi ricomprese nell'ecosystem quality assumendo meno importanza relativa per i motivi descritti nel paragrafo analogo su base ettaro.

Analisi di filiera

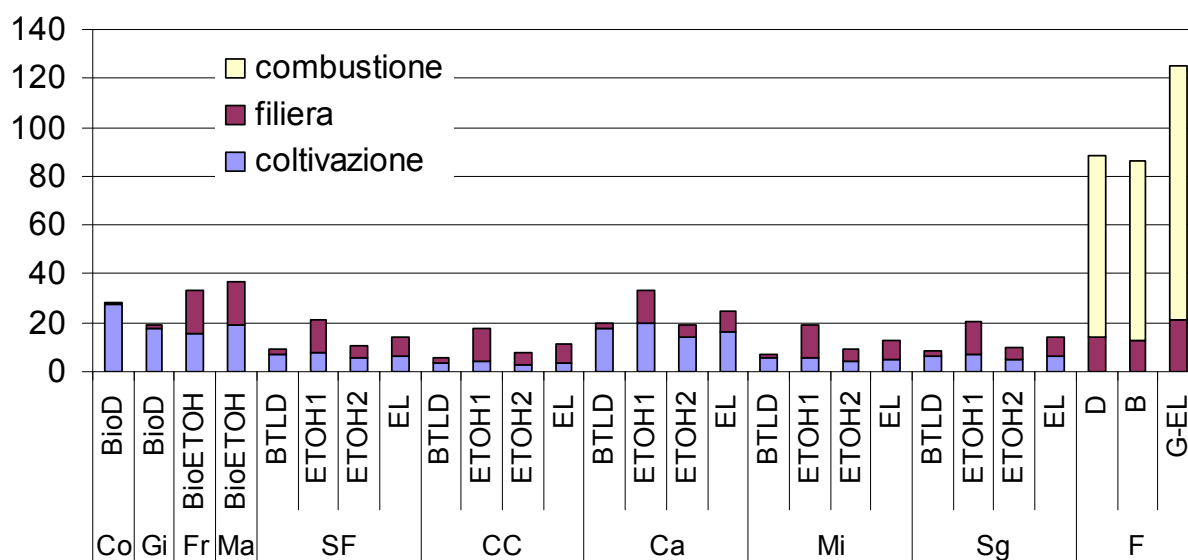


Figura 26. Livelli di emissione di GHG espressi in kg GJ^{-1} di $\text{CO}_2\text{eq.}$ dei biocombustibili in confronto con combustibili tradizionali tenendo conto di tutte le emissioni dell'intera filiera. Gli scenari principali sono identificati come segue: Sg=Switchgrass; CC=Canna Comune; Mi=Miscanto; Ca=Cardo; SF=Sorgo da Fibra; Ma=Mais; Fr= Frumento; Co=Colza; Gi=Girasole; F= Fossile, i sottoscenari sono indicati come segue: BioD=biodiesel di I generazione, BioETOH=bioetanolo di I gen.; BTLD=biodiesel di II gen.; ETOH1=bioetanolo di II gen. idrolisi termochimica; ETOH2=bioetanolo di II gen. idrolisi enzimatica; EL=generazione elettrica; D=diesel convenzionale; B=benzina convenzionale; G-EL=elettricità da gas metano. per i combustibili fossili si calcola anche l'emissione in fase di combustione finale.

Come si nota in figura 26 tutti gli scenari che comprendono i biocombustibili sono molto meno impattanti sull'effetto serra rispetto ai combustibili tradizionali, con riduzioni di emissione di almeno il 60% nel confronto benzina-etanolo, con punte di riduzione che superano il 90% per l'etanolo di II generazione ottenuto per idrolisi enzimatica. La comparazione diesel-biodiesel trova nuovamente favorevole il biocombustibile, con riduzioni minime del 60% che raggiungono anche il 90%

se si considerano i migliori scenari della seconda generazione; infine la generazione elettrica, si dimostra molto meno impattante se ottenuta da biomassa rispetto al gas metano, con livelli di emissione abbattuti di almeno l'80% in tutti gli scenari.

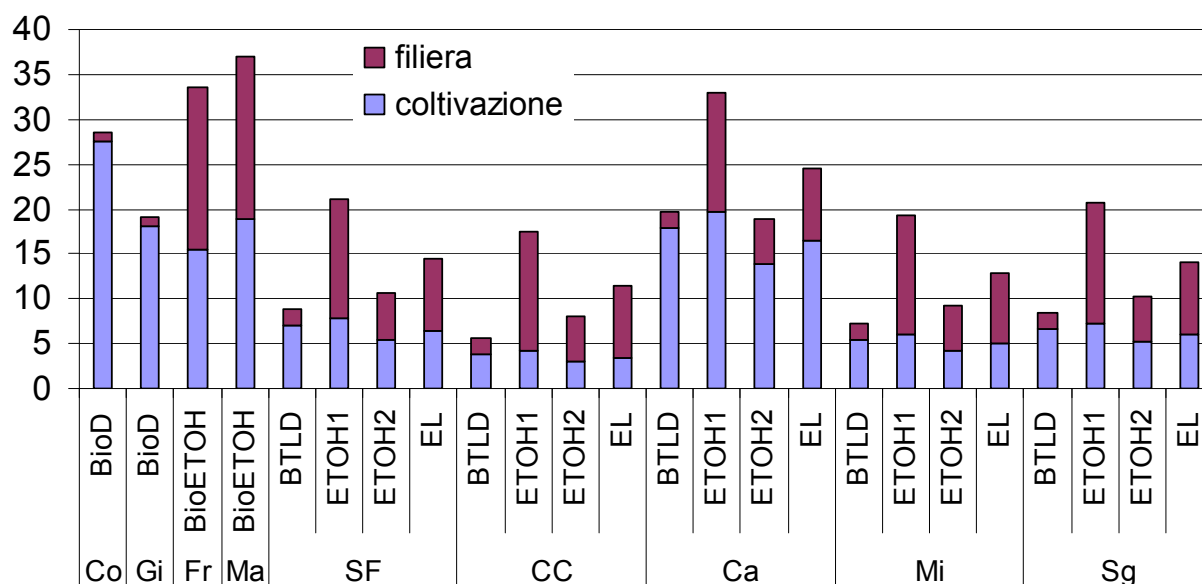


Figura 27. Livelli di emissione di GHG espressi in kg GJ^{-1} di $\text{CO}_2\text{eq.}$ dei biocombustibili tenendo conto di tutte le emissioni dell'intera filiera. Gli scenari principali sono identificati come segue: Sg=Switchgrass; CC=Canna Comune; Mi=Miscanto; Ca=Cardo; SF=Sorgo da Fibra; Ma=Mais; Fr= Frumento; Co=Colza; Gi=Girasole. i sottoscenari sono indicati come segue: BioD=biodiesel di I generazione, BioETOH=bioetanolo di I gen.; BTL=biodiesel di II gen.; ETOH1=bioetanolo di II gen. idrolisi termochimica; ETOH2=bioetanolo di II gen. idrolisi enzimatica; EL=generazione elettrica.

Dal confronto fra gli scenari dei biocombustibili (Fig. 27) si nota come la fase di coltivazione incida sempre significativamente sull'impatto della totale filiera produttiva, si ricorda che alla fase agricola sono accorpati anche i processi a monte della coltivazione, per la produzione dei mezzi tecnici e delle materie prime impiegate.

I biocombustibili di II generazione risultano sempre più convenienti degli stessi prodotti di I generazione in termini di emissioni di gas climalteranti, anche nel caso del cardo, che è il peggior scenario per quanto riguarda i biofuel di II generazione, il confronto del BTL con il biodiesel da colza e girasole, e dei due scenari ETOH con l'etanolo da frumento e da mais risultano più vantaggiosi. Ovviamente i

risultati ottenuti su base energia per le diverse colture si riflettono sul risultato dell'intera filiera nei diversi scenari, rendendo più o meno convenienti i diversi sottoscenari a seconda dell'impatto della fase di coltivazione, che in tutte le situazioni considerate incide significativamente sul bilancio totale delle emissioni (dal 23 al 96% a seconda degli scenari).

Discussioni

I dati ottenuti dalla comparazione sia su base areica che su base energetica sono elementi decisionali determinanti che forniscono indicazioni tra loro complementari

Nel primo caso l'analisi sarà molto utile per la pianificazione territoriale nella scelta della dislocazione dei processi produttivi, che dovrà cercare di evitare l'insediarsi di attività produttive particolarmente impattanti su un determinato comparto ambientale, in territori sensibili a quel tipo di impatto (es. evitare processi che hanno elevata emissione di composti eutrofizzanti, in zone con falda molto superficiale o vicino a corsi d'acqua).

La valutazione su base energetica invece può essere utile soprattutto nella valutazione dell'impatto dell'intera filiera produttiva e dei cosiddetti impatti globali, come ad esempio l'emissione dei gas serra, che producono un danno generalizzato sull'intero pianeta, indipendentemente dalla zona in cui vengono emessi, e che, particolarmente in questo caso sono da tenere in considerazione poiché, trattandosi di specie coltivate per produrre energia, interessano un settore che è il principale responsabile di questo tipo di emissioni.

La comparazione su base areica evidenzia chiaramente come il mais, coltura irrigua ed altamente esigente in fertilizzanti abbia un bilancio ambientale sfavorevole rispetto alle altre colture, per le altre specie a ciclo annuale però non si riscontrano significative differenze a livello generale, i livelli di impatto infatti non mostrano valori molto diversi, e soprattutto, nelle diverse categorie non esiste uno scenario che prevale o che è sempre peggiore rispetto agli altri.

Si ritiene opportuno analizzare più approfonditamente la categoria d'impatto "ecotossicità marina" (MW-t) poiché risulta, sia dai dati standardizzati, sia da quelli normalizzati, il comparto più colpito dai processi agricoli. È interessante notare come nella MW-t la differenza fra le annuali sia percentualmente meno

incidente rispetto a tutte le altre categorie considerate, mentre negli altri comparti si registra sempre una differenza minima del 30% fra il mais (scenario più impattante) e le altre annuali, in MW-t le differenze risultano sempre inferiori al 25%. Inoltre, la differenza relativa fra le annuali, mais escluso, è risibile, su queste basi pertanto, la predilezione di una coltura rispetto all'altra risulterebbe di poca importanza. Escludendo quindi il mais dal confronto, si può affermare che l'analisi ambientale su base areica non fornisce un criterio di scelta discriminante fra le colture a ciclo annuale, anche il punteggio singolo in ecopunti conferma tale tesi.

Sicuramente però l'analisi su base areica, oltre a individuare il mais come coltura più sfavorevole evidenzia palesemente il vantaggio ambientale che deriva dalla coltivazione di specie poliennali rispetto alle annuali, anche in questo caso però, la comparazione fra sole poliennali non fornisce un'indicazione univoca di convenienza in termini ambientali verso una specifica coltura. Analizzando però la categoria MW-t si nota un certo beneficio ambientale dello switchgrass rispetto alle altre poliennali, vista l'incidenza della coltivazione su questa categoria, il dato risulta interessante poiché in termini relativi, la riduzione di impatto rispetto alle altre poliennali è di circa il 30%.

Come si è visto, l'analisi su base areica non è sufficiente a fornire strumenti decisionali univoci, quindi occorre integrare i risultati ottenuti con l'analisi su base energetica, che fornisce criteri decisionali più chiari.

Ragionando per “comparti” in base alla potenziale destinazione delle produzioni, si individuano 3 scenari che risultano essere i più vantaggiosi in termini ambientali:

fra le oleaginose il girasole presenta in tutti i casi migliori performance rispetto a colza, inoltre fra le annuali da granella è spesso la coltura meno impattante, questo va sottolineato soprattutto per la categoria MW-t per i motivi di cui sopra;

fra i cereali il risultato è meno chiaro, poiché c'è alternanza fra frumento e mais nelle varie categorie d'impatto, e soprattutto il mais è meno impattante su MW-t pertanto se la scelta fra le due colture dipendesse solo dall'impatto sul GJ prodotto

si propenderebbe per lo scenario “mais” tuttavia rivedendo anche l’impatto su base areica, e considerando le scarse differenze su base energetica, è probabilmente il frumento la coltura che nel complesso comporta il minor impatto sull’ambiente;

fra le lignocellulosiche la canna comune è senza ombra di dubbio la miglior specie, ancora una volta però, le esigue differenze con lo switchgrass, e la buona performance di quest’ultimo su base areica, non permettono una scelta univoca, in definitiva, dal punto di vista ambientale possono considerarsi analoghe, almeno per il comparto agricolo. Anche il Miscanto, pur essendo leggermente peggiore di switchgrass su base ettaro e di arando su base GJ, non è significativamente differente dalle altre due specie. È importante evidenziare l’enorme differenza fra lignocellulosiche e specie da granella (minimo il 50% di impatto in meno per le prime), che sottolinea il vantaggio, in termini ambientali, dell’utilizzo dell’intera biomassa epigea, e non solo di parti della pianta, a scopo energetico.

Analizzando invece il problema dal punto di vista della durata del ciclo (annuale o poliennale) che come si è detto può essere vincolante in termini di organizzazione aziendale, si nota come il sorgo sia senza dubbio la miglior coltura fra le annuali, poiché in termini di impatto per ettaro risulta molto simile alle annuali da granella (eccetto mais), e su base energetica l’impatto è inferiore di almeno il 60% rispetto a qualsiasi altra annuale in tutte le categorie considerate.

Fra le poliennali l’unico dato che emerge chiaramente è la scarsa convenienza nella coltivazione del cardo, poiché i risultati su base areica non forniscono una discriminante univoca, ma i dati su base energetica individuano chiaramente il cardo come poliennale più impattante sotto tutti i punti di vista. Va ricordato che probabilmente l’areale nord italiano non è quello ottimale per la coltivazione di questa specie, e che probabilmente in zone mediterranee la performance produttiva sarebbe migliore, e conseguentemente l’impatto potrebbe risultare molto simile a quello delle altre poliennali.

Ne caso in cui le colture abbiano un comportamento analogo in entrambe le

comparazioni, come nel caso dello switchgrass e della canna comune, la scelta della coltura più idonea può essere fatta in funzione di altri fattori che possono essere economici, agronomici o logistici.

La valutazione dei danni che si ottiene grazie alla metodologia EI-99, che permette di differenziare i danni su 3 macro-categorie, rende possibile una valutazione soggettiva dell'importanza relativa da assegnare ad ogni comparto; può essere quindi utilizzato un “set di pesatura” che assegna importanza relativa alle 3 macrocategorie, modificando l'incidenza degli impatti degli scenari considerati. Ad esempio, l'elevata incidenza che un determinato processo genera nella macrocategoria “salute umana” (H-h) può essere valutato di scarso interesse se il target (popolazione umana) non è alla portata delle sostanze nocive emesse. Nel caso specifico allo studio il danno relativamente elevato generato dai processi agricoli esaminati risulta di scarso interesse se, come spesso avviene, nel territorio limitrofo alle coltivazioni non vi sono centri abitati.

Le stesse considerazioni devono essere fatte esaminando le categorie di impatto, tratte dalla metodologia CML, o da altre metodologie di valutazione delle sostanze emesse (mid-point), su cui il programma si basa per la determinazione degli ecopunti da attribuire ad una macrocategoria. Ad esempio, la macrocategoria “ecosystem quality” valuta i danni partendo dallo stesso tipo di emissioni che generano i risultati di CML: “ecotossicità delle acque marine” (MW-t), “ecotossicità delle acque dolci” (FW-t), “ecotossicità terrestre” (T-t), “acidificazione” (Ac) ed “eutrofizzazione” (Eu). In tutti gli scenari esaminati 4 categorie su 5 esprimono valori bassi mentre la restante categoria MW-t ottiene punteggi relativamente molto elevati. Con principio analogo a quello descritto in precedenza, nella scelta del set di pesatura soggettivo si assegnerà maggior importanza relativa al punteggio della “ecosystem quality” solo nel caso in cui l'areale dove si prevede saranno ospitati i processi produttivi sia particolarmente sensibile all'inquinamento delle falde e/o vicino al mare.

L'analisi di filiera, benché condotta esclusivamente sui gas serra, evidenzia il

vantaggio ambientale di tutti i biocombustibili, rispetto alle fonti energetiche fossili, imputabile in larga parte alla ciclizzazione del carbonio di origine biogenica, che non grava sul bilancio delle emissioni in fase di combustione finale. Ancora una volta appare svantaggioso, almeno in linea generale, coltivare specie da granella per la produzione di biofuels, in quanto lo sfruttamento solo parziale della biomassa epigea rende sconveniente il bilancio finale nonostante l'efficienza impiantistica, almeno nella produzione di biodiesel sia elevata (quasi il 100% della resa in olio).

Nel bilancio della CO₂ mancano alcune voci, in particolare, in emissione non sono considerati i carichi dovuti alla liberazione di protossido d'azoto dai terreni, tuttavia si considera che le colture dedicate siano coltivate in terreni già ad uso agricolo. Pertanto il sistema di riferimento alternativo alla coltivazione di biomasse sarebbe comunque soggetto a normali pratiche agricole e quindi già caratterizzato da livelli di emissione di N₂O paragonabili a quello delle colture da biomassa, o addirittura inferiore, poiché è verosimile che per le poliennali si riduca la mineralizzazione della sostanza organica, e quindi anche la volatilizzazione dell'azoto, per via delle minori lavorazioni.

Il problema dell'N₂O si pone soprattutto quando nuovi terreni naturali vengono messi a coltura (e.g. le peatland malesi ed indonesiane per la coltivazione di palma da olio), in questo caso, infatti, si espone a rapida mineralizzazione un suolo naturale, normalmente ricco in sostanza organica, che per giunta sarà sottoposto ad arricchimento di azoto con le concimazioni, incrementando fino a otto volte le emissioni di protossido (IPCC, 2006). Si ricorda che tale composto è fortemente influente sul bilancio dei gas serra poiché ha un potenziale di riscaldamento globale 296 volte superiore alla CO₂.

L'altra voce di bilancio trascurata è stata il sink di carbonio nel sottosuolo, che sembra essere più consistente nelle poliennali rispetto alle specie annuali (Monti e Zatta 2009, Zan et al. 2001), tuttavia è assai difficile quantificare con esattezza il potenziale d'immagazzinamento della CO₂ di queste specie, in quanto non è ad

oggi disponibile un modello in grado di valutare tale potenziale.

Ancora, occorre sottolineare come il modello teorico applicato alla metodologia LCA, non tenga conto di alcune variabili di tipo climatico, biologico e pedologico, che sono fondamentali nello studio di processi agricoli. Ad esempio la lisciviazione dell'azoto non tiene conto del tipo di coltura, delle precipitazioni, del tipo di terreno, dell'epoca di distribuzione, etc. è pertanto ipotizzabile che un consistente errore di valutazione possa essere commesso in questo comparto, che incide sull'eutrofizzazione e sulla tossicità delle acque.

Un altro parametro importante non considerato dal modello LCA è l'erosione dei suoli, un aspetto di fondamentale importanza parlando di impatti dell'agricoltura sull'ambiente, specie in zone declivi e soggette a dissesto idrogeologico. Una possibile soluzione al problema, per ottenere almeno un'indicazione di massima sul potenziale erosivo delle diverse specie, potrebbe essere il modello RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), che può tornare utile anche se non si conosce l'areale specifico in cui le colture andranno impiantate. L'equazione, infatti, è caratterizzata dai seguenti fattori: $A = R * K * LS * C * P$, dove A =potenziale livello di erosione, R = coefficiente di precipitazioni, K = coefficiente di erodibilità del suolo, LS = coefficiente che tiene conto della lunghezza e della pendenza dell'appezzamento in esame, C = coefficiente di coltura e management del suolo, P = coefficiente di incidenza delle pratiche antierosive (sistemazioni, strip crops, etc.). È chiaro come tutti i coefficienti, ad eccezione di C e P siano sito-specifici, quindi non applicabili ad un modello generalizzato. Il coefficiente P è altresì indipendente dalla coltura che si desidera analizzare, pertanto un rapido ed efficace sistema di analisi è dato dal semplice confronto del coefficiente C per le diverse colture, che fornisce un dato, esclusivamente qualitativo, che non permette di stabilire l'entità dell'erosione provocata, ma rende possibile stabilire quale coltura sia meno impattante sull'erosione, considerando paritari tutti gli altri fattori. Ad esempio, consultando la lista dei "C factors" messa a disposizione dall'università del Michigan, si nota

come per le specie poliennali il coefficiente colturale sia più basso rispetto alle annuali, e tenda a diminuire fortemente negli anni successivi grazie alla non lavorazione dei suoli (e.g. per la medica il coefficiente C passa da 0,16 a 0,006 andando dal primo al quinto anno di coltivazione, già dal secondo anno il valore è bassissimo, pari a 0,028; per mais il valore varia da 0,20 a oltre 0,40), per i cereali autunno-vernini invece si registrano coefficienti normalmente compresi fra 0,10 e 0,20).

È chiaro che tutta una serie di fattori non presi in considerazione renda la metodologia LCA non precisissima per le valutazioni ambientali in agricoltura, tuttavia si ritiene comunque efficace soprattutto a titolo comparativo, poiché, ipotizzando la coltivazione delle diverse specie nel medesimo areale, quindi con le stesse variabili ambientali, è ipotizzabile che l'impatto reale sia sì diverso da quello ottenuto dal modello, ma proporzionalmente errato nei diversi scenari, quindi nel confronto relativo il problema risulta marginale.

Conclusioni

Dai risultati ottenuti nella presente tesi è possibile concludere che:

- La categoria di impatto più colpita dai processi agricoli, in termini di emissioni è l'ecotossicità delle acque marine, ovviamente intesa come “final target” indipendentemente dal tempo in cui le sostanze emesse raggiungono l'obiettivo sensibile. In termini di impatto potenziale, lo sfruttamento delle risorse è la categoria più colpita.
- Il mais risulta la coltura più impattante su base areica (ha), per tutte le categorie d'impatto considerate, mentre le poliennali, e fra queste in particolare lo switchgrass, sono quelle a minor impatto
- Su base energetica (GJ) la coltura più impattante risulta essere colza, per via della minore energia netta prodotta per ettaro, seguono le altre colture da granella, mentre le lignocellulosiche, sia annuali che poliennali, presentano valori nettamente meno impattanti. Per questo si può affermare che lo sfruttamento a scopo energetico dell'intera biomassa epigea è da preferirsi rispetto all'utilizzo della sola granella.
- L'analisi di filiera per quanto riguarda le emissioni di CO₂ equivalenti per GJ di energia all'utilizzatore finale, mostra un impatto nettamente inferiore di tutti i biocombustibili, ottenuti dalle colture in esame, rispetto ai combustibili fossili. Nell'analisi relativa fra scenari bioenergetici, i biofuel di II generazione risultano sempre meno impattanti rispetto ai rispettivi di I generazione, questo è principalmente imputabile al minor impatto di coltivazione delle specie lignocellulosiche.
- Dall'analisi di filiera si evince anche come la fase agricola incida significativamente nell'impatto degli scenari bioenergetici, addirittura per oltre l'80% per biodiesel di I e II generazione, indipendentemente dalla materia prima di partenza.

- L'analisi per mid-point è utile per la comparazione degli scenari ma non fornisce un'indicazione del potenziale di impatto, altresì l'analisi per end-point, pur fornendo un'indicazione più precisa in merito, sembra essere troppo generica per analisi di sistemi sottoposti a variabili ambientali, quali i processi agricoli.
- La metodologia LCA presenta alcune lacune per l'analisi degli scenari di coltivazione, che devono essere colmate integrando le metodologie esistenti con modelli d'impatto studiati appositamente per il comparto agricolo.

Bibliografia

- A.D.E.R. (Association pour le Développement des Energies Renouvelables). 2000. L'energia al futuro. BFS edizioni. Rovesciare il futuro n.9
- Adati S. 1958 Studies on the genus *Miscanthus* with special reference to the Japanese species for breeding purpose as fodder crops. Bulletin of the Faculty of Agronomy, Mie University, 17 p. 1–112.
- Alderson, J., and. Sharp, W.C.1993. Grass varieties in the United States. Agricultural Handbook .170. USDA, Washington D.C.
- Amaducci M.T., Venturi G., Benati R., Amaducci S. 2000. Crop yield and quality parameters of four annual fibre crops (hemp, kenaf, maize and sorghum) in the North of Italy. Industrial Crops and Products, 11 p. 179-186
- Anand, S., Hanson, K. 1997. Disability-adjusted life years: a critical review. J. Health Econ. 16, 685-702.
- Badino V., Baldo G.L., :”LCA: istruzioni per l'uso” 1998 Progetto Leonardo, Bologna.
- Baldoni R., Giardini L. “Coltivazioni erbacee” volume “Cereali e proteaginose” Ed.2000 Pàtron editore pp.200-220
- Baldoni R., Giardini L. “Coltivazioni erbacee” volume “Piante oleifere, da zucchero, da fibra, orticole e aromatiche” Ed.2000 Pàtron editore
- Beaty, E.R., J.L. Engel and J.D. Powell. 1978. Tiller development and growth in Switchgrass. J. Range Manage. 31 p. 361-365.
- Bonari E., 2006. Il possibile ruolo delle biomasse da energia nell'agricoltura toscana. Proceedings of the conference “progetto activia: scenari per l'agricoltura non food in toscana”. Firenze

- Borlenghi R., :” Guida alle norme ISO 14000” Hoepli 2007
- Bovey, R.W., Hussey, M.A. 1991. Response of selected forage grasses to herbicides. *Agronomy Journal* 83 p. 709-713.
- Braga, A. 2003. L’Utilizzo delle biomasse in un panorama di produzione energetica diversificata. Atti del Convegno ATI-APER “Le biomasse nel panorama energetico italiano”.
- Brentrup F., Kuster J., Kuhlmann H., Lammel J., “Environmental impact assessment of agricultural production system using the LCA methodology. I Theoretical concept of a LCA method tailored to crop production”. *European Journal of Agronomy*, Volume 20, 3, 2004, 247-264
- Brentrup F., Kuster J., Kuhlmann H., Lammel J., Barraclough P., “Environmental impact assessment of agricultural production system using the LCA methodology. II The application to N fertilizer use in winter wheat production systems”. *European Journal of Agronomy*, Volume 20, Issue 3, February 2004, 265-279
- Brentrup F., Kuster J., Kuhlmann H., Lammel J.: “Application of the Life Cycle Assessment methodology to agricultural production: an example of sugar beet production with different forms of nitrogen fertilizers”. *European Journal of Agronomy*, Volume 14, 3, 2001, Pages 221-233
- Chiacchierini E., Lucchetti, M.C. 1992, "Materie prime, trasformazione ed impatto ambientale", Roma, Edizioni Kappa, p. 69-105, 180-186, 280-286, 292-312.
- Chieragato M., Fauri M., Lorenzoni A., Savorana F. 2002. Le ESCO e il mercato dell’efficienza energetica. Esculapio ed.
- Christian, D.G. and H.W. Elbersen. 1998. Prospects of using *Panicum Virgatum* (Switchgrass) as a biomass energy crop. In: N. ElBassam (ed.).
- Christou M., Mardikis M., Alexopoulou E. 2001 Research on the effect of

- CIPE. “Libro Bianco per la valorizzazione energetica delle fonti rinnovabili”. Roma, Aprile 1999.
- Consoli, F., Allen, D., Boustead, I., Fava, J., Franklin, W., Jensen, A.A., De Oude, N., Parrish, R., Perriman, R., Postletwaite, D., Quay, B., Sèguin, J., Vignon, B., 1993. (Eds.) Guidelines for life-cycle assessment: A “Code of Practice”. Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), Brussels
- Dalianis C., Panoutsou C., Dercas N., 1996 Spanish thistle artichole *Cynara cardunculus* L., under Greek conditions. In: Chartier, P., Ferrero G.L., Henius U.M., Hultberg S., Sachau J., Wiinblad M. (Eds.), Proceedings of the 9th European Bioenergy Conference, Copenhagen Denmark, Biomass for Energy and the Environment, 24–27 June. Pergamon Press, Oxford, p. 663–668.
- Decreto Legislativo 16 marzo 1999, n. 79, “Attuazione della direttiva 96/92/CE recante norme comuni per il mercato interno dell’energia elettrica”, in “Gazzetta Ufficiale” n. 75 del 31 marzo 1999.
- Delibera CIPE 29 aprile 1992, n. 6, “Prezzi dell’energia elettrica relativi a cessione, vettoriamento e produzione per conto dell’ENEL, parametri relativi allo scambio e condizioni tecniche generali per l’assimilabilità a fonte rinnovabile”, in “Gazzetta Ufficiale” n. 109 del 12 maggio 1992.
- Della Rocca C. 2001. I processi e le tecnologie di gassificazione delle biomasse e dei rifiuti solidi. In Utilizzazione termica dei rifiuti – Relazioni Tecniche. 3° Convegno Nazionale, Abano Terme, 31 maggio – 1 giugno: 523-533.
- Deuter M. 2000 Breeding approaches to improvement of yield and quality in

- Dewolf J., Van Longenhove H.,:”Renewables-based technology” 2006 Jhon willey &sons, Ltd.
- Elbersen, H.W., Ocumpaugh, W.R., Hussey, M.A., Sanderson and C.R. Tischler. 1998. Switchgrass and kleingrass crown node elevation under low light. Crop. Sci. 38: (May-June issue).
- Fazio S., Monti A., Venturi G. Cradle-to-Farm Gate Life Cycle Assessment in Perennial Energy Crops (2008). “European Journal of Agronomy 2009
- Fazio S., Monti A., Venturi G., “Assessment of the environmental impacts of four energy crops using life cycle inventory” European biomass conference 2007
- Fernandez J., 1990. Lignocellulosic biomass production from annual energy crops. Commission of the European Communities. Luxembourg Report EUR 12631 EN-C p. 54.
- Fernandez J., 1998a. Cardoon In: El Bassam, N. (Ed.), Energy Plant Species. James & James Sci. Pub. Ltd., London, p. 113–117.
- Fernandez J., 1998b. Cynara cardunculus network, Commission of the European Communities Brussels. Final Report AIR CTT 921089, p. 248.
- Fernandez J., Curt M. D., Aguado P. L., 2006 Industrial applications of Cynara cardunculus L. for energy and other uses. Industrial Crops and Products, 24 p. 222–229.
- Fernandez J., Curt M.D., Luque, S., Aguado, P., Sanchez, G., Lopez, C., Hidalgo, M., 2002 Multilocal study of the contents in N, P and K of Cynara cardunculus L. grown for biomass production. In: Palz, W., Spitzer, J.,

- Fernandez J., Curt, M.D., 2005 State-of-the-art of *Cynara cardunculus* as an energy crop. In: Sjunnesson L., Carrasco J.E., Helm P., Grassi A. (Eds.), Proceedings of the 14th European Biomass Conference. Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 17–21 October Paris, France. ETA-Renewable Energies and WIP Renewable Energies, p. 22–27.
- Fernandez, J., 1993 Production and utilization of *Cynara cardunculus* L. biomass for energy, paper-pulp and food industry. Commission of the European Communities Brussels. Final Report JOUB 0030-ECCE, p.92.
- Foti S., Mauromicale G., Raccuia S.A., Fallico B., Fanella F., Maccarone E., 1999 Possible alternative utilization of *Cynara* spp.. Biomass, grain yield and chemical composition of grain. Ind. Crops Prod., 10 p. 219–228.
- Gasol M.C., Gabarell X., Anton A., Rigola M., Carrasco J., Ciria P., Solano M.L., Rieradevall J., “Life cycle assessment of a *Brassica carinata* bioenergy cropping system in southern Europe”. Biomass and Bioenergy, Volume 31, Issue 8, August 2007, Pages 543-555
- Gasol M.C., Gabarell X., Anton A., Rigola M., Carrasco J., Ciria P., Solano M.L., Rieradevall J.:”LCA of poplar bioenergy system compared with *Brassica carinata* energy crop and natural gas in regional scenario” Biomass and Bioenergy, Volume 33, Issue 1, January 2009, Pages 119-129
- Gerardi, V., Nobili, A. Incentivazione dell’energia da biomasse: aspettative, difficoltà, certezze. Atti del Convegno ATI-APER “Le biomasse nel panorama energetico italiano”. 2003.
- Greef J.M., Deuter M. 1993 Syntaxonomy of *Miscanthus* × *giganteus*. Angewandte Botanik, 67 p. 87–90.

- Halifax, J.C. and C.J. Scifres. 1972. Influence of dicamba on development of range grass seedlings. *Weed Sci.* 20 p. 414-416.
- Hayashi K., “Life cycle assessment of agricultural production systems: current issues and future perspectives” 2006
- Hidalgo M., Fernandez J. 2001 Biomass production of ten populations of giant reed (*Arundo donax* L.) under the environmental conditions of Madrid (Spain). In: Kyritsis S, Beenackers A.A.C.M., Helm P., Grassi A., Chiaramonti D., editors. *Biomass for Energy and Industry: Proceeding of the First World Conference*, Sevilla, Spain, 5–9 June 2000. James & James (Science Publishers) Ltd., p. 1881–4.
- Hoepli, AA.VV. 1998. *Manuale di agricoltura*.
- Hopkins, A.A., C.M. Taliaferro, C.D. Murphy and D.A. Christian. 1996. Chromosome number and nuclear DNA content of several Switchgrass populations. *Crop Sci.* 36 p.1192-1195.
- Hopkins, A.A., K.P. Vogel, K.J. Moore, K.D. Johnson and I.T. Carlson. 1995a. Genotype effects and genotype by environment interactions for traits of elite Switchgrass populations. *Crop Sci.* 35 p.125-132.
- Hopkins, A.A., K.P. Vogel, K.J. Moore, K.D. Johnson and I.T. Carlson. 1995b. Genotypic variability and genotype X environment interactions among Switchgrass accessions from the midwestern USA. *Crop Sci.* 35 p. 565-571.
- Ignaciuk A., Vohringer F., Ruijs A., van Ierland E.C.: Competition between biomass and food production in the presence of energy policies: a partial equilibrium analysis. (2006). “Energy policy” Vol.46: 1127-1138.
- International Organizzazione Standardization (ISO 14040-43). 1997. Life cycle assesment – principles and frameworks. ISO 14040-43, 1997.
- Jung, G.A., J.A. Shaffer, W.L. Stout and M.T. Panciera. 1990. Warm-season

- Kiniry, J.R., M.A. Sanderson, J.R. Williams, C.R. Tischler, M.A. Hussey, W.R. Ocumpaugh, J.C. Read, G.v. Esbroeck and R.L. Reed. 1996. Simulating Alamo Switchgrass with the ALMANAC model. *Agron. J.* 88 p. 602-606.
- Legge 9 gennaio 1991, n. 9, “Norme per l’attuazione del nuovo Piano energetico nazionale: aspetti istituzionali, centrali idroelettriche ed elettrodotti, idrocarburi e geotermia, autoproduzione e disposizioni fiscali”, in “Gazzetta Ufficiale” n. 13 del 16 gennaio 1991.
- Lewandowski I., Scurlock J.M.O., Lindvall E., Christou M. 2003. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. *Biomass and Bioenergy* 25 p. 335 – 361.
- Lorenzoni A., De Paoli L. 1998. Economia e politica delle fonti rinnovabili e della cogenerazione. F. Angeli
- Madakadze, I.C. 1997. Physiology, productivity and utilization of warm season (C4) grasses in a short growing season area. PhD thesis McGill University, Montreal, Quebec, Canada.
- Malagoli C. 1994 Agricoltura e Ambiente, contributo allo sviluppo sostenibile. CLUEB Bologna
- Martin, A.R., R.S. Moomaw and K.P. Vogel. 1982. Warm-season grass establishment with atrazine. *Agron. J.* 74 p. 916-920.
- McLaughlin, S., J. Bouton, D. Bransby, R. Conger, W. Ocumpaugh, D. Parrish, C. Taliaferro, K. Vogel and S. Wullschleger. 1997. Evaluating and improving Switchgrass as a bioenergy crop. In: R. P. Overend and E. Chornet (eds.). Making a business from biomass in energy, environment, chemicals, fibres and materials, vol. 2. Pergamon, Montreal, Canada. pp.

- McMillan, C. 1959. The role of ecotypic variation in the distribution of the central grasslands of North America. *Ecol. Monogr.* 29 p. 285-308.
- Miller, M.S. e Owsley.1994: Switchgrass seeding and establishment: Soil type and seeding depth effects on germination, emergence and development. *Proceedings of the American Forage and Grassland Council* 1994.
- Milne, Thomas A., Elam, Carolyn C., Robert J. Evans, Hydrogen from Biomass State of the Art and Research Challenges. National Renewable Energy Laboratory Golden, CO USA 2001.
- Monti, A., Venturi, G., Elbersen, H.W. 2001. Evaluation of the establishment of lowland and upland Switchgrass (*Panicum Virgatum* L.) varieties under different tillage and seedbed condition in northern Italy. *Soil & Tillage research* 63. p. 75-83.
- Monti A., Zatta A. Root distribution and soil moisture retrieval in perennial and annual energy crops in Northern Italy. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Volume 132, Issues 3-4, August 2009, Pages 252-259
- Monti A., S. Fazio, G. Venturi. The discrepancy between plot and field yields: Harvest and storage losses of switchgrass Biomass and Bioenergy, Volume 33, Issue 5, May 2009, Pages 841-847
- Moser, L.E. and K.P.Vogel. 1995. Switchgrass, Big Bluestem, and Indiangrass. In: *An introduction to grassland agriculture*. R. F. Barnes, D. A. Miller and C. J. Nelson (eds.). Forages, 5th ed. Vol.1, Ames, IA: Iowa University Press, pp. 409-420.
- Muir, J.P., M. A. Sanderson, W. R. Ocumpaugh, R. M. Jones, and R. L. Reed. 2001. Biomass production of “Alamo” Switchgrass in response to nitrogen, phosphorus, and row spacing in diverse environments. *Agron. J.* 93

- Murray, C.J.L., 1994. Quantifying the burden of disease: the technical basis for disability-adjusted life years. B. World Health Organ. 72, 429-445.
- Myers, R.E. and J. Dickerson. 1984. How to plant and maintain Switchgrass. As nesting and winter cover for pheasants and other wildlife. NY Department of Agriculture / NY Soil
- Newman, P.R. and L.E. Moser. 1988. Seedling root development and morphology of cool-season and warm season forage grasses. Crop Sci. 28 p.48-151.
- Nielsen J.B.H., Oleskowicz-Popiel P., Al Seadi T., Energy crop potential for bioenergy in EU. 15^o European biomass conference & exhibition. 2007. Berlin, Germany
- Ocumpaugh, W.R., M.A. Sanderson, M.A. Hussey, J.C. Read, C.R. Tischler and R.L. Reed. 1997. Evaluation of Switchgrass cultivars and cultural methods for biomass production in the south-central U.S. Final report. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN. contract #19X-SL128C.
- Osman, A.E. 1979. Productivity of irrigated tropical grasses under different clipping frequencies in the semi desert region of the Sudan. J. Range Manage. 32 p.82-185.
- Parrish, D.J., D.D. Wolf and W.L. Daniels. 1997. Switchgrass as a bio fuel crop for the upper Southeast: Variety trials and cultural improvements. Five year report. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN. contract #19X-SK098C.
- Perdue R.E. 1958 *Arundo donax* - Source of musical reeds and industrial cellulose. Economic Botany, 12 p. 368 – 404.
- Porter C.L. 1966. An analysis of variation between upland and lowland Switchgrass, *Panicum Virgatum* L., in central Oklahoma. Ecology, 47 p.980-

- Prek M. (2004): “Environmental impact and life cycle assessment of heating and air conditioning systems, a simplified case study”. *Energy and Buildings*, Volume 36, Issue 10, October 2004, Pages 1021-1027
- Samson, R., P. Girouard, and Y. Chen. 1997. Evaluation of Switchgrass and short rotation forestry willow in eastern Canada as bio-energy and agri-fibre feedstocks. In: R. P. Overend and E. Chornet (eds.) *Proceedings of the third conference of the Americas. Making a business from biomass in energy, environment, chemical, fibers and materials*, Montreal, Canada. P.145-151.
- Samson, R.A. and J.A. Omielan. 1992. Switchgrass: A potential biomass energy crop for ethanol production Thirteenth North American Prairie Conference. Windsor, Ontario. P.253-258.
- Sanderson, M.A. and D.D. Wolf. 1995. Morphological development of Switchgrass in diverse environments. *Agron. J.* 87 p.908-915.
- Sanderson, M.A., R.L. Reed, S.B. McLaughlin, S.D. Wullschleger, B.V. Conger, D.J. Parrish, D.D. Wolf, C. Taliaferro, A.A. Hopkins, W.R. Ocumpaugh, M.A. Hussey, J.C. Read and C.R. Tischler. 1996. Switchgrass as a sustainable bioenergy crop. *Bioresource Technology*. 56 p.83-93.
- Sharma K.P., Kushwaha S.P.S., Gopal B. 1998 A comparative study of stand structure and standing crops of two wetland species, *Arundo donax* and *Phragmites karka*, and primary production in *Arundo donax* with observations on the effect of clipping. *Tropical Ecology*, 39 p. 39.
- Shatalov A.A., Pereira H. 2001 *Arundo donax* L. (giant reed) as a source of fibres for paper industry: perspectives for modern ecologically friendly pulping technologies. In: Kyritsis S., Beenackers A.A.C.M., Helm P., Grassi A., Chiaramonti D., editors. *Biomass for Energy and Industry: Proceeding of the First World Conference*, Sevilla, Spain, 5–9 June 2000. London: James

- Smart, A.J. and L.E. Moser. 1997. Morphological development of Switchgrass as affected by planting date. *Agron. J.* 89 p.958-962.
- Talbert, L.E., D.H. Timothy, J.C. Burns, J.O. Rawlings and R.H. Moll. 1983. Estimates of genetic parameters in Switchgrass. *Crop Sci.* 23 p.725-728.
- Taliaferro, C.M. and A.A. Hopkins. 1997. Breeding and selecting of new Switchgrass varieties for increased biomass production. Five year summary report. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN.
- Turhollow, A.F. 1991. Screening herbaceous lignocellulosic energy crops in temperate regions of the USA. *Bioresource Technology.* 36 p.247-252.
- Vassey, T.L., J.R. George and R.E. Mullen. 1985. Early-, mid-, and late-spring establishment of Switchgrass at several seeding rates. *Agron. J.* 77 p.253-257.
- Venturi G., Amaducci M.T. 1999. *Le colture da fibra.* Edagricole
- Venturi, P., Venturi, G. 2003. Analysis of energy comparison for crops in European agricultural systems. *Biomass and Bioenergy,* 25 p. 235 – 255
- Wilson, A.M. and D.D. Briske. 1979. Seminal and adventitious root growth of blue grama seedlings on the central plains. *J. Range Manage.* 32 p.209-213.
- Wolf, D.D. and D.A. Fiske. 1995. Forages. Planting and managing Switchgrass for forage, wildlife, and conservation. Virginia Cooperative Extension p.418-013.
- Wullschleger, S.D., M.A. Sanderson, S.B. McLaughlin, D.P. Biradar and A.L. Rayburn. 1996. Photosynthetic rates and ploidy levels among populations of Switchgrass. *Crop Sci.* 36 p.306-312.

- Zan CS, JW. Fyles, P. Girouard, R.A. Samson. Carbon sequestration in perennial bioenergy, annual corn and uncultivated systems in southern Quebec Agriculture, Ecosystems & Environment, Volume 86, Issue 2, August 2001, Pages 135-144
- Zeiders, K.E. 1984. Helminthosporium spot blotch of Switchgrass in Pennsylvania. Plant Disease. 68 p.120- 122.

Bibliografia on-line

- [COM (2006) 848] Comunità europea, comunicazione della commissione, del 10 gennaio 2007, “Tabella di marcia per le energie rinnovabili. Le energie rinnovabili nel 21° secolo: costruire un futuro più sostenibile” <http://europa.eu/scadplus/leg/it/lvb/l27065.htm>
- Benedetto M., “Gas serra: anche per Exxon in forte aumento”. http://www.cambiaclima.it/apps/category.php?cat_id=12
- Botero E, Naranjo C, Aguirre J (2008): Apeironpro, software for life cycle assessment (LCA) and environmental performance evaluation (EPE). Int J LCA 13 (2) 172.174 <http://dx.doi.org/10.1065/lca2007.05.335>
- BP “BP Statistical Review of World Energy” 2008. <http://www.bp.com>
- Bransby D. Switchgrass profile
- Caputo P., Romer A., “Recupero di energia da biomassa”, <http://www.poweron.ch/it/stromprod/content---1--1078>.
- CONCAWE, JRC and EUCAR, well to wheels analysis. <http://ies.jrc.ec.europa.eu/our-activities/support-for-eu-policies/well-to-wheels-analysis/WTW.html>
- Duke J.A. Handbook of energy crops.

- ECOINVENT, swiss centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH.
<http://www.ecoinvent.org/documentation/reports/>
- Elbersen, H.W. . The European Switch Grass project.
<http://www.eeci.net/archive/biobase/B10574.html>
- Elbersen, H.W.,
- “Swichgrass (Panicum Virgatum L.) as an alternative energy crop in Europe. Initiation of a productivity network. Final Report for the period from 01-04-1998 to 30-09-2001. <http://www.Switchgrass.nl>
- ENEA Ente per le Nuove tecnologie, l’Energia e l’Ambiente: “Rapporto energia e ambiente 2007, analisi e scenari <http://www.enea.it>
- EU “COMUNICAZIONE DELLA COMMISSIONE Piano d’azione per la biomassa” 2005. http://europa.eu/index_it.htm/
- EU “Energy community work programme 2008 – 2009”
http://europa.eu/index_it.htm/
- EUROSTAT “Energy yearly statistics 2005” <http://ec.europa.eu/eurostat>
- Eurostat; Pocketbooks. “Energy, Transport and environment indicator” 2007 Edition. <http://ec.europa.eu/eurostat/>
- Gestore Servizi Elettrici “Statistiche sulle fonti rinnovabili in Italia” 2007
www.grtn.it/
<http://bioenergy.ornl.gov/papers/misc/switchgrass-profile.html>
- IEA “Energy statistics manual”, International Energy Agency, IEA publications, France. (2005) <http://www.iea.org/>
- IEA “Key world energy statistics 2008”, International Energy Agency, IEA publications, France. (2008) <http://www.iea.org/>

- IEA “World Energy Outlook”, International Energy Agency, IEA publications, France. (2004)<http://www.iea.org/>
- IEA “World Energy Outlook”, International Energy Agency, IEA publications, France. (2006) <http://www.iea.org/>
- IEA “World Energy Outlook”, International Energy Agency, IEA publications, France. (2007) <http://www.iea.org/>
- IEA “Worldwide Trends in Energy Use and Efficiency” (2007) <http://www.iea.org/>
- IEA Energy Technology Essentials “Biomass for Power Generation and CHP” 2007 www.iea.org/Textbase/techno/essentials.htm
- Ingallina P., Clerici M.G., “Il panorama energetico mondiale”. La Chimica e l’Industria, maggio 2002. <http://www.minerva.unito.it/Chimica&Industria/ChimicaIndustria1/PanoramaEnergetico.htm> (ultimo accesso: gennaio 2007).
- Kenneth P. Vogel, John J. Brejda, Daniel T. Walters, and Dwayne R. Buxton Biomass Production of ‘Alamo’ Switchgrass in Response to Nitrogen, Phosphorus, and Row Spacing. <http://agron.scijournals.org/cgi/content/abstract/93/4/896>
- Lombardo A., “Gas serra, i dati ufficiali: aumentano nei paesi ricchi”. <http://www.cambioclima.it/apps/essay.php?id=69>
- M. A. Sanderson, R. R. Schnabel, W. S. Curran, W. L. Stout, D. Genito, and B. F. Tracy Switchgrass and Big Bluestem Hay, Biomass, and Seed Yield Response to Fire and Glyphosate Treatment <http://agron.scijournals.org/cgi/content/abstract/93/4/896>
- Ministero dello sviluppo economico “Bilancio energetico nazionale 2006” www.sviluppoeconomico.gov.it

- Muir J.P. Matt A. Sanderson, William R. Ocumpaugh, Ronald M. Jones and Roderick L. Biomass Production of ‘Alamo’ Switchgrass in Response to Nitrogen, Phosphorus, and Row Spacing <http://agron.scijournals.org/cgi/content/abstract/93/4/896>
- OECD/IEA “Bioenergy Project Development & Biomass supply” 2007 <http://www.iea.org/>
- PRè consultants “The Eco-indicator 99 A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment Methodology Report” <http://www.pre.nl>
- PRè consultants “SimaPro 7.0 Demo manual” <http://www.pre.nl>
- PRè consultants “SimaPro 7.0 Introduction into LCA” <http://www.pre.nl>
- Pretolani R. Le opportunità della PAC per lo sviluppo delle biomasse ad uso energetico https://www.cti2000.it/virt/cti2000/solidi/PDF/002_Pretolani.pdf.
- Riva G. l’uso energetico della biomassa. (ultimo accesso novembre 2007). https://www.cti2000.it/virt/cti2000/solidi/PDF/001_Relazione%20Riva%20completa.pdf
- Romer A., “Energia da Biomassa” <http://www.poweron.ch/it/stromprod/content---1--1078.html>
- Samson, R., Mehdi, B. 1998. Strategies to reduce the ash content in perennial grasses. <http://www.reap-canada.com/Reports/reportsindex.htm>
- Svizzera Energia, “Approvvigionamento Energetico Globale”,(2002) <http://www.energie-schweiz.ch/internet/00480/?lang=it>
- Teel A. Management Guide for the Production of Switchgrass for Biomass Fuel in Southern Iowa. <http://www.extension.iastate.edu/Publications/PM1710.pdf>
- Tenenbaum D.J.. Environmental Health Perspectives. 110(1). January 2002. <http://greennature.com/article644.html> Wright. Potential Supply and Cost of

- UE, 2001. Biomass and the Environment
<http://greennature.com/article650.html>
- Unione petrolifera; “Annual report 2008” Roma
<http://www.unione petrolifera.it>
- Unione petrolifera, “Notizie Statistiche Petrolifere 8-9/2008”
<http://www.unione petrolifera.it>
- Unione petrolifera, “Previsioni di domanda energetica e petrolifera italiana 2008 – 2020” <http://www.unione petrolifera.it>
- Vogel K.P., M.R. Schmer, R.K. Perrin, L.E. Moser, and R.B. Mitchell Field Scale Evaluation of Switchgrass Grown as a Bioenergy Crop in the Northern Plains. <http://www.ag.ndsu.nodak.edu/streeter/2002report>.

Siti web consultati

- Abiotec : <http://www.abiotec.com/>
- Alterenergy – <http://www.alterenergy.co.nz/>
- APEAC <http://www.apec.it/biomasse.htm>
- ASSA. <http://www.assa-cee.org/>
- Aster. <http://www.aster.it/>
- Autorità Energia - http://www.autorita.energia.it/relaz_ann/index.htm
- CIPE – <http://www.cipecomitato.it/>
- Enel - <http://www.enel.it/>
- EnelGreenPower: <http://enelgreenpower.enel.it/it/?source=wr002>

- Energia On Line -
<http://www.catpress.com/agenergia/energiaonline/lezione0/index.shtml>
- Energia On Line.
<http://www.catpress.com/agenergia/energiaonline/lezione0/index.shtml>
- EnergiaBlu - http://www.energiablu.com/chi_siamo.htm
- Energoclub. <http://www.energoclub.it/>
- EUROPA – http://europa.eu/index_it.htm/
- EUROSTAT - <http://ec.europa.eu/eurostat/>
- Green nature: <http://greennature.com>
- GRTN - <http://www.grtn.it/ita/index.asp>
- IEA. <http://www.iea.org/>
- Il sole 24 ore - <http://www.ilsole24ore.com/>
- Il sole a 360 gradi - <http://www.ilsolea360gradi.it>
- ISES. <http://www.isesitalia.it/>
- Itabia - <http://www.itabia.it>
- Min. Politiche Agricole e Forestali. <http://www.politicheagricole.it/>
- Ministero dell'Ambiente - <http://www.minambiente.it/Sito/home.asp>
- Ministero dell'Industria. <http://www.minindustria.it/>
- Native grasses: <http://www.nativegrasses.com>
- Phyllis. <http://www.ecn.nl/phyllis/singl.html>
- PRè consultants – <http://www.pre.nl>
- REAP Canada - <http://www.reap-canada.com>
- Rinnovabili.it – quotidiano on-line - <http://www.rinnovabili.it/>

- SETAC – <http://www.setac.org/>
- Switchgrass.nl - <http://www.Switchgrass.nl>
- Unione Europea. http://www.europa.eu.int/index_it.htm
- Università di Trento/Facoltà di Ingegneria. <http://www.ing.unitn.it/>
- WEO. <http://www.worldenergyoutlook.org/>